

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# **ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ТА ДІАГНОСТИКИ**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для студентів,  
які навчаються за спеціальністю 171 «Електроніка»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2020

Електронні системи контролю якості та діагностики [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 171 «Електроніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Л.Д. Писаренко, С.Р. Михайлов. – Електронні текстові дані (1 файл: 9,14 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 200 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 6 від 31.01.2020 р.)  
за поданням Вченої ради факультету електроніки (протокол № 01/2020 від 27.01.2020 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

## **ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ТА ДІАГНОСТИКИ**

Укладачі: *Писаренко Леонід Дмитрович, д-р техн. наук, проф.  
Михайлов Сергій Ростиславович, канд. техн. наук, доц.*

Відповідальний редактор: *Кузьмичев А.І., доктор технічних наук, професор*

Рецензент: *Трапезон К.О., кандидат технічних наук, доцент кафедри  
звукотехніки і реєстрації інформації Національного технічного  
університету України «Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»*

Навчальний посібник «Електронні системи контролю якості та діагностики» присвячений узагальненому і систематизованому викладенню фізичних методів і систем неруйнівного контролю якості та діагностики матеріалів і виробів в промисловості, наноелектроніці, а також для діагностики різних середовищ.

Навчальний посібник призначений для студентів закладів вищої освіти спеціальності 171 «Електроніка», може бути корисним студентам інших спеціальностей, зокрема спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка».

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ МАТЕРІАЛІВ І ВИРОБІВ .....	10
1.1 Основні види діагностики матеріалів.....	10
2. РАДІОХВИЛЬОВА ДІАГНОСТИКА .....	18
2.1 Загальні питання радіохвильової діагностики .....	18
2.2 Техніка безпеки при радіохвильовому контролі .....	19
2.3 Основні особливості електромагнітних процесів у НВЧ- діапазоні.....	20
2.4 Загальні питання побудови апаратури радіохвильового контролю.....	25
2.5 Особливості взаємодії радіохвильового випромінювання з об'єктами контролю.....	26
2.6 Елементна база та основні пристрої апаратури радіохвильового контролю .....	29
2.6.1 Джерела надвисокочастотних коливань.....	29
2.6.2 Основні пристрої для формування та обробки НВЧ-сигналів і полів .....	31
2.6.3 Індикатори та перетворювачі радіохвильового випромінювання .....	36
2.6.4 Одноканальні методи радіохвильового контролю.....	39
2.6.5 Двоканальні методи радіохвильового контролю .....	40
2.6.6 Параметричні методи контролю .....	43
2.6.7 Візуалізація радіохвильових полів .....	46
2.7 Теми практичних (семінарських) занять і контрольні питання до розділу 2.....	48
3. ОПТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ.....	51
3.1 Загальні питання оптичного контролю .....	51
3.1.1 Загальні правила з техніки безпеки та охорони праці .....	52

3.2 Джерела світла .....	53
3.3 Основні оптичні елементи та пристрої.....	55
3.4 Первинні перетворювачі оптичного випромінювання .....	59
3.5 Основні методи оптичного контролю .....	64
3.5.1 Візуально-оптичні методи контролю .....	64
3.5.2 Фотометричні методи контролю.....	67
3.5.3 Контроль телевізійними методами .....	69
3.5.4 Інтерференційні методи контролю .....	70
3.5.5 Голографічні методи .....	71
3.6 Практичні схеми реалізації оптичного контролю.....	72
3.6.1 Пристрій і принцип роботи вимірювального мікроскопа .....	72
3.6.2 Схеми побудови ендоскопів.....	76
3.6.3 Структурна схема телевізійної установки для оптичного контролю об'єктів .....	78
3.6.4 Застосування телевізійної автоматики для оптичного контролю об'єктів .....	80
3.6.5 Принцип роботи та схема інтерферометра.....	82
3.6.6 Методики голографічного контролю .....	85
3.7 Теми практичних (семінарських) занять і контрольні питання до розділу 3 .....	87
4. РАДІАЦІЙНИЙ КОНТРОЛЬ.....	89
4.1 Загальні питання радіаційного контролю .....	89
4.2 Техніка безпеки при радіаційному контролі.....	92
4.3 Основні ефекти при взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною.....	94
4.4 Джерела іонізуючого випромінювання .....	101
4.5. Детектори іонізуючого випромінювання .....	111
4.6. Радіаційні системи неруйнівного контролю .....	124
4.7 Спеціальні методи радіаційного контролю.....	142

4.8 Теми практичних (семінарських) занять і контрольні питання до розділу 4.....	145
5. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ТА АКУСТИЧНІ РЕЗОНАНСИ У МІКРОДІАГНОСТИЦІ ТВЕРДИХ ТІЛ ТА ПЛАЗМИ .....	147
5.1 Високочастотні та резонансні властивості металів .....	149
5.1.1 Фізичний механізм циклотронного резонансу.....	150
5.1.2 Загальні положення циклотронного резонансу в металах .....	152
5.2 Високочастотні резонансні властивості напівпровідників .....	153
5.2.1 Особливості поширення електромагнітної хвилі у плазмі напівпровідника.....	153
5.2.2 Плазмові нестійкості в напівпровідниках при впливі електромагнітних полів.....	155
5.3 Ультразвукові та гіперзвукові хвилі в мікродіагностиці матеріалів.....	157
5.3.1 Особливості поширення ультразвуку в металах.....	157
5.3.2 Особливості поширення гіперзвукових хвиль у твердому тілі.....	162
5.4 Практична реалізація резонансних явищ у мікродіагностиці твердих тіл та плазми .....	163
5.4.1 Метод ЦР-спектроскопії для визначення енергетичного спектра та кінетики електронів на фермі-поверхні .....	163
5.4.2 Метод відсікання циклотронних резонансів у пластині для визначення діаметрів електронних орбіт та їх анізотропії .....	165
5.4.3 Взаємне перетворення електромагнітних і звукових хвиль у нормальному металі .....	166
5.4.4 Збудження, трансляція і детектування високочастотного гіперзвуку .....	169
5.4.5 Експериментальна установка для досліджень взаємодії електронного пучка з плазмовими коливаннями в напівпровіднику ....	172
5.4.6 Вимірювання властивостей плазми в міліметровому і субміліметровому діапазонах хвиль.....	174

5.5 Теми практичних (семінарських) занять та контрольні питання до розділу 5 .....	177
6. АПАРАТУРНІ КОМПЛЕКСИ НОВИХ НАПРЯМІВ ДІАГНОСТИКИ МІКРО- І НАНОРОЗМІРНИХ ОБ'ЄКТІВ.....	180
6.1 Сфокусовані пучки заряджених частинок у діагностиці матеріалів.....	180
6.1.1 Ядерний сканувальний мікрозонд .....	181
6.2 Ближньопольова НВЧ-діагностика матеріалів і середовищ .....	189
6.2.1 Загальна характеристика методу ближньопольової діагностики .....	189
6.2.2 Типові схеми мікрохвильових мікроскопів.....	193
6.3 Теми практичних (семінарських) занять і контрольні питання до розділу 6.....	196
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	198

## ВСТУП

Рівень розроблення і впровадження нових технологій у наукоємні сфери промисловості характеризується не лише обсягом виробництва та асортиментом продукції, що випускається, але також показниками її якості. Висока якість забезпечується підвищеним рівнем контролю продукції, зокрема діагностикою матеріалів, з яких вона виготовлена. Трудомісткість контролю якості деяких виробів у промисловості та розроблення нових матеріалів становить 15–20 % загальних трудовитрат на їх виготовлення [1–8].

Одним зі шляхів вирішення цього завдання є використання фізичних методів, пов'язаних із впливом на об'єкт електромагнітних або акустичних хвиль різних діапазонів, а також сфокусованих пучків заряджених частинок. Фізичні методи контролю та діагностики матеріалів, виробів і середовищ є частиною більш великої галузі науки – інтроскопії, тобто внутрішньобачення, що охоплює медичну та плазмову діагностику, вивчення підземних структур, пошук прихованих предметів і т. д.

Завдання, що можуть бути вирішені радіофізичними методами діагностики, можна звести до таких:

- дефектоскопія – виявлення несутцільностей та дефектів матеріалу;
- вимірювання геометричних розмірів об'єкта;
- контроль фізико-хімічних властивостей: хімічного складу, структури (структурометрія), міцності матеріалу;
- вивчення внутрішньої будови складних виробів і матеріалів (інтроскопія);
- вивчення об'єктів, структурованих у мікро- і нанорозмірних масштабах.

У ході вирішення перелічених вище завдань надзвичайно перспективним є радіохвильової метод діагностики [1, 9] унаслідок розширення застосування в різних сферах науки і техніки композитних, пластмасових, полімерних та інших діелектричних матеріалів.

Оптичний метод контролю та діагностики [1, 5–8], який є найбільш доступним і легко реалізованим у видимому світлі, зараз знаходиться на етапі свого другого народження, збагачуючись досягненнями електронної техніки, появою нових джерел світла оптичного діапазону, прогресом у галузі перетворювальної техніки, поєднанням оптичних пристроїв із обчислювальною технікою через електронні блоки. Розширюється використання оптичних квантових генераторів, що працюють в інфрачервоному, видимому або ультрафіолетовому діапазоні спектра електромагнітних коливань.

Радіаційний контроль [4–8, 25, 26] на сьогодні є першим за обсягом застосувань у промисловості. Напрямки її розвитку визначаються загальними тенденціями розвитку вимірювальної техніки – застосування нових первинних вимірювальних перетворювачів та індикаторів, оснащення обладнання обчислювальною технікою та мікроелектронними елементами, змінами в спеціальних блоках, характерних для цього виду діагностики.

Крім перелічених вище традиційних фізичних методів контролю та діагностики матеріалів, необхідно відзначити появу нетрадиційних методів, які, наприклад, базуються на резонансних явищах при аномальній прозорості металів, прояви макроскопічної квантової когерентності у взаємодії між електронами, електромагнітними та звуковими хвилями. Як наслідок, електронні резонанси та хвильові процеси в металах стали дуже ефективними під час організації методів експериментального дослідження електронного енергетичного спектра, кінетичних характеристик, нелінійних властивостей і явищ [10].

У сфері вивчення високочастотних властивостей напівпровідників можна умовно виділити такі напрямки: плазмові властивості напівпровідників, нелінійне поширення електромагнітних хвиль у напівпровідниках, резонансні явища та електромагнітні властивості феромагнітних напівпровідників і напівпровідників із надґратками.



Крім електромагнітних хвиль, ефективним способом мікродіагностики матеріалів і середовищ є акустичні методи досліджень в області ультразвукових частот (100–1000 МГц) [2, 3] і гіперзвукових частот ( $10^{11}$  Гц та вище) [10].

Разом із тим, незважаючи на можливості перелічених вище методик того чи іншого виду контролю та діагностики, вони все ж таки обмежені особливостями його фізичної взаємодії з досліджуваним об'єктом. Тому велике значення має комплексні контроль та діагностика, що базуються на органічному поєднанні методик декількох видів під час дослідження одного об'єкта. Складність реалізації цієї ідеї пояснюється необхідністю глибокого вивчення фізичної суті кожного методу і розроблення узагальненого алгоритму обробки різноманітної інформації про конкретний тип об'єкта.

Одним із перспективних напрямків у цьому плані є використання сфокусованих пучків заряджених частинок [11, 12], на основі яких створені високоефективні апаратурні комплекси із дослідження різних властивостей матеріалів та об'єктів, структурованих у мікро- і нанорозмірних масштабах: растрові та просвічувальні електронні мікроскопи; комплекси, призначені для електронно-пучкової літографії [13–15].

Проведений у цьому напрямку аналіз літературних джерел [16] показав, що досі одним із найбільш ефективних інструментів при мікроаналізі властивостей матеріалів є ядерний скануючий мікрозонд [12]. Принцип його роботи полягає в тому, що прискорений до енергій декількох мегаелектронвольтів пучок іонів фокусується на поверхні досліджуваного зразка в пляму з розмірами близько одного мікрметра.

Значна увага в сучасних працях приділяється питанням розвитку ближньопольової НВЧ-діагностики [16], що дозволяє отримати інформацію про поверхневі й приповерхневі властивості різних середовищ у мікрохвильовому масштабі. Вона базується на реєстрації частини НВЧ-випромінювання, локалізованої в ближньому полі мікрозонда, що дозволяє значно підвищити роздільну здатність і подолати дифракційну межу на заданих частотах радіохвиль.

# 1. КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ МАТЕРІАЛІВ І ВИРОБІВ

В основу класифікації фізичних методів контролю та діагностики покладені фізичні процеси взаємодії електромагнітного і акустичного полів, а також сфокусованих пучків заряджених частинок з об'єктом контролю. З точки зору фізичних явищ, на яких вони базуються, можна виділити дев'ять видів неруйнівного контролю: магнітний, електричний, вихрострумовий, радіохвильовий, тепловий, оптичний, радіаційний, акустичний і мікрозондовий. Кожен із видів контролю поділяється на методи щодо запропонованих нижче ознак, які характерні не лише для класичних схем діагностики [1–9], а й для мікрозондової діагностики [11–16].

*Характер взаємодії поля з об'єктом.* Взаємодія має бути такою, щоб контрольована ознака об'єкта змінювалася при впливі на нього поля або пучків заряджених частинок.

*Первинний інформативний параметр  $p$* – конкретний параметр поля (амплітуда поля, час його поширення і т. д.) або спектральний склад випромінювання, зміну якого використовують для характеристики контрольованого об'єкта.

*Спосіб отримання первинної інформації*– конкретний тип датчиків, що використовують для вимірювання та фіксації згаданих інформаційних параметрів.

## 1.1 Основні види діагностики матеріалів

1. *Магнітний вид* контролю базується на аналізі взаємодії магнітного поля з контрольованим об'єктом. Його, як правило, застосовують для контролю зразків із феромагнітних матеріалів. Процес намагнічування і перемагнічування феромагнітного матеріалу супроводжується гістерезисними явищами, що схематично зображені на рис. 1.1. Властивості, які потрібно контролювати (хімічний склад, структура, наявність

нешільностей та ін.), зазвичай пов'язані з параметрами процесу намагнічування і петлею гістерезису.

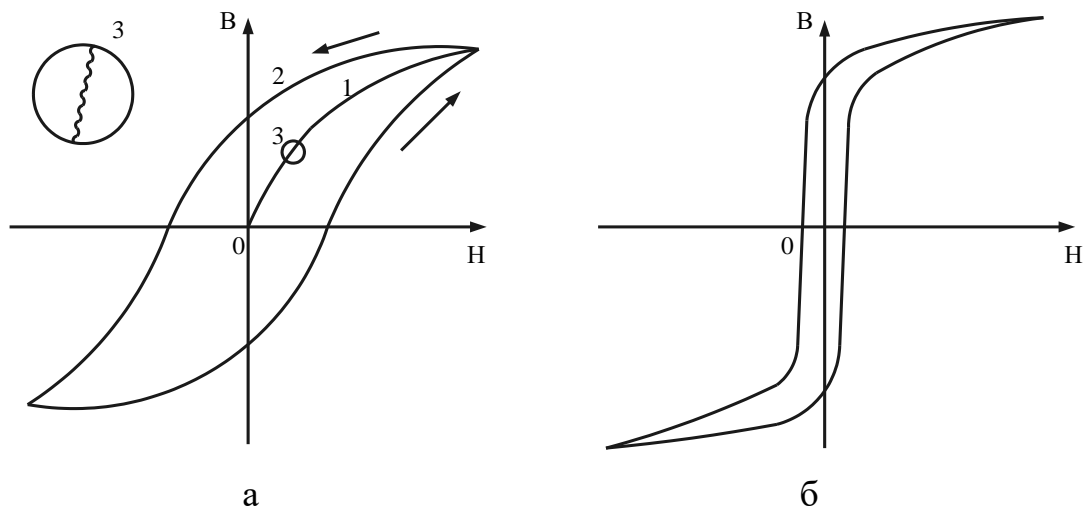


Рисунок 1.1 – Криві намагнічування ферромагнітних матеріалів:  
а – магнітожорсткого; б – магнітом'якого (1 – основна крива намагнічування, 2 – петля гістерезису, 3 – стрибкоподібний характер намагнічування, що спостерігається при точних вимірах)

Магнітожорсткі матеріали (загартована сталь) порівняно з магнітом'якими матеріалами (не загартовані сталі) мають велику коерцитивну силу  $H_c$ , меншу магнітну проникність  $\mu = dB/dH$  і намагніченість  $I = (\beta / \mu_0) - H$ ,  $\mu_0$  – магнітна стала, що дорівнює  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ (В} \cdot \text{с)} / (\text{А} \cdot \text{м})$ . Зазвичай  $\mu$  і  $I$  для характеристики матеріалу ферромагнетика вимірюють при малій напруженості намагнічуваного поля  $H$ . У деяких випадках також вимірюють залишкову намагніченість  $B_r$ . Ці первинні інформативні параметри використовують для контролю ступеня загартування, характеристик міцності та інших властивостей матеріалів. Наявність і кількість феритної складової в неферромагнітних матеріалах можуть бути визначені за намагніченості насичення, тобто при великих полях намагнічування. Ця величина тим більша, чим більший вміст фериту.

Високоточне вимірювання кривої намагнічування показує, що вона має стрибкоподібний характер (область 3 на рис. 1.1) уділянці крутого підйому. Це так званий ефект Баркгаузена. Стрибки виникають унаслідок перемагнічування областей спонтанного намагнічування (доменів), що містяться у феромагнітному матеріалі. Параметри стрибків кривої намагнічування (їх кількість, величина, тривалість, спектральний склад) використовують як первинний інформативний параметр для контролю таких властивостей матеріалу, як хімічний склад, структура, ступінь пластичної деформації.

При намагнічуванні об'єкта контролю, поблизу поверхні якого є несутільність (дефект), в області дефекту відбувається різка просторова зміна напруженості магнітного поля, виникає поле розсіяння (рис. 1.2). Зміна напруженості магнітного поля, точніше градієнта напруженості, використовують як первинний інформативний параметр для виявлення дефектів.

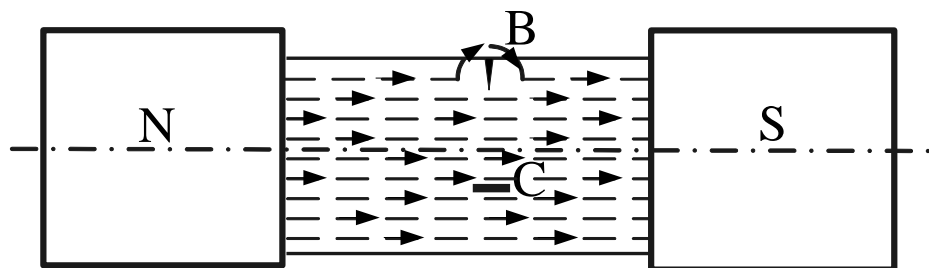


Рисунок 1.2 – Приклад просторової зміни магнітного поля в області дефекту

2. *Електричний вид* неруйнівного контролю ґрунтується на реєстрації параметрів електричного поля, що взаємодіє з контрольованим об'єктом (власне *електричний метод*), або поля, що виникає в контрольованому об'єкті внаслідок зовнішньої дії (*термоелектричний* і *трибоелектричний* методи). Первинними інформативними параметрами є електричні ємність і потенціал.

Ємнісний метод застосовують для контролю діелектричних або напівпровідникових матеріалів. Зазміною діелектричної проникності, зокрема її реактивної частини (діелектричними втратами), контролюють хімічний склад пластмас, напівпровідників, наявність у них нещільностей, вологість сипких матеріалів та інші властивості.

Метод електричного потенціалу застосовують для контролю провідників. Вимірюючи падіння потенціалу на деякій ділянці, контролюють товщину провідного шару, наявність нещільностей поблизу поверхні провідника. Електричний струм огинає поверхневий дефект, за збільшенням падіння потенціалу на ділянці з дефектом визначають глибину нещільності з похибкою в кілька відсотків.

3. *Вихрострумний вид* неруйнівного контролю базується на аналізі взаємодії електромагнітного поля перетворювача з електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться в контрольованому об'єкті. Його застосовують лише для контролю виробів з електропровідних матеріалів. Вихрові струми в об'єкті збуджують за допомогою перетворювача у вигляді котушки індуктивності, що живиться змінним або імпульсним струмом. Приймальним перетворювачем (вимірником) слугує та сама або інша котушка. Збуджувальну і приймальну котушки розташовують або з одного боку, або по різні боки від контрольованого об'єкта (*метод проходження*).

За взаєморозташуванням перетворювача та об'єкта розрізняють прохідні, накладні та екранні перетворювачі. На рис. 1.3 наведено приклад вихрострумowego прохідного перетворювача.

Контроль вихровими струмами виконують без безпосереднього контакту перетворювачів з об'єктом, що дозволяє вести його при взаємному переміщенні перетворювача та об'єкта з великою швидкістю, полегшуючи тим самим автоматизацію контролю.

4. *Радіохвильовий вид* неруйнівного контролю та його різновид – ближньопольова НВЧ-діагностика – базуються на реєстрації змін параметрів електромагнітних хвиль радіодіапазону, що взаємодіють із контрольованим

об'єктом. Зазвичай застосовують хвилі надвисокочастотного (НВЧ) діапазону довжиною 1–100 мм і контролюють вироби з матеріалів, де радіохвилі не надто сильно загасають: діелектрики (пластмаси, кераміка, скловолокно), магнітодіелектрики (ферити), напівпровідники, тонкостінні металеві об'єкти. За характером взаємодії з об'єктом контролю розрізняють методи *прохідного*, *відбитого*, *розсіяного* випромінювання і *резонансний* метод. Первинними інформативними параметрами є амплітуда, фаза, поляризація, частота, геометрія поширення вторинних хвиль, час їх проходження та ін.

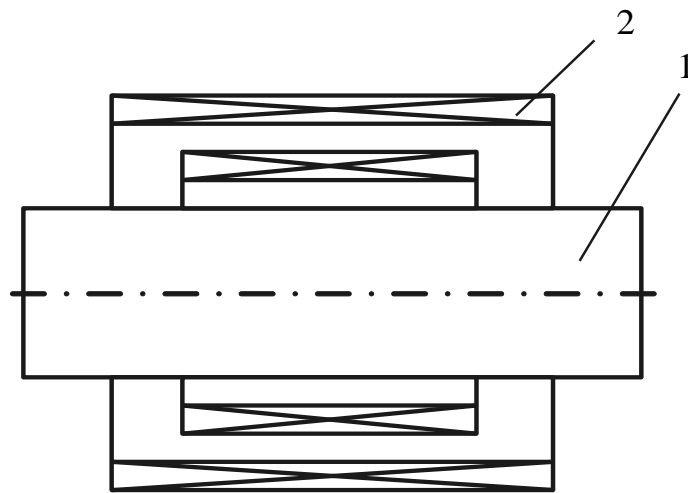


Рисунок 1.3 – Вихрострумівий перетворювач прохідного типу

5. *Тепловий вид* базується на реєстрації змін теплових або температурних полів об'єктів. Він застосовується до об'єктів із будь-яких матеріалів. За характером взаємодії поля з контрольованим об'єктом розрізняють методи: *пасивний*, або власного випромінювання (на об'єкт не впливають зовнішнім джерелом енергії), та *активний* (об'єкт нагрівають або охолоджують від зовнішнього джерела). Вимірюваним інформативним параметром є температура, або тепловий потік.

6. *Оптичний вид* неруйнівного контролю ґрунтується на спостереженні або реєстрації параметрів оптичного випромінювання, що взаємодіє з контрольованим об'єктом. За характером взаємодії розрізняють методи *прохідного*, *відбитого*, *розсіяного* та *індукованого* випромінювання. Останнім терміном визначають оптичне випромінювання об'єкта під дією зовнішнього

впливу, наприклад люмінесценцію. Первинними інформативними параметрами є амплітуда, фаза, ступінь поляризації, частота або частотний спектр, час проходження світла через об'єкт, геометрія заломлення та відбиття променів.

Оптичні методи широко застосовують для контролю прозорих об'єктів. У них виявляють макро- і мікроефекти, структурні неоднорідності, внутрішні напруження (за обертанням площини поляризації). Використання гнучких світловодів, лазерів, оптичної голографії, телевізійної техніки різко розширило сферу застосування оптичних методів, підвищило точність вимірювання.

7. *Радіаційний вид* неруйнівного контролю ґрунтується на реєстрації та аналізі проникаючого іонізуючого випромінювання після його взаємодії з контрольованим об'єктом. Залежно від природи іонізуючого випромінювання цей вид контролю поділяють на підвиди: *рентгенівський*, *гамма-*, *бета-* (потік електронів), *нейтронний* методи контролю. Останнім часом знаходять застосування навіть потоки позитронів, за ступенем поглинання яких визначають ділянки об'єкта, збіднені або збагачені електронами.

Найбільш широко для контролю якості використовують рентгенівське та гамма-випромінювання. Їх можна використовувати для контролю виробів із найрізноманітніших матеріалів, шляхом підбору необхідного частотного діапазону. Ці види випромінювання, як і раніше розглянуті, є електромагнітними хвилями. При цьому частота коливань підвищується від методу до методу. Магнітні та електричні методи використовують постійні або повільно мінливі поля. У вихрострумовому контролі частоти досягали мегагерцового діапазону. Далі частота збільшувалася при використанні НВЧ, інфрачервоного, оптичного випромінювань. Рентгенівське і гамма-випромінювання є найбільш короткохвильовими з усіх, розглянутих раніше, наприклад гамма-випромінювання має довжину хвилі  $10^{-10} - 10^{-13}$  м (частоту  $3 \cdot 10^{18} - 3 \cdot 10^{21}$  Гц).

8. *Акустичний вид* неруйнівного контролю, на відміну від вищерозглянутих, базується на реєстрації параметрів пружних хвиль, що виникають або збуджуються в об'єкті. Найчастіше використовують пружні хвилі ультразвукового діапазону (із частотою коливань вище 20 кГц), цей метод називають *ультразвуковим*. На відміну від усіх раніше розглянутих методів тут застосовують і реєструють не електромагнітні, а пружні хвилі, параметри яких тісно пов'язані з такими властивостями матеріалів, як пружність, густина, анізотропія (нерівномірність властивостей із різних напрямків) та ін. Акустичні властивості твердих матеріалів і повітря настільки сильно відрізняються, що акустичні хвилі відбиваються від найтонших зазорів шириною  $10^{-6} - 10^{-4}$  мм. Цей вид контролю придатний до всіх матеріалів, що досить добре проводять акустичні хвилі металів, пластмас, кераміки тощо.

Активні ультразвукові методи, різноманітні за схемами застосування, набули великого поширення.

Найбільш широке застосування отримав метод відбиття, або *ехо-метод* (рис. 1.4). Перетворювач 1 збуджує в об'єкті контролю 2 ультразвуковий імпульс. Він відбивається від нижньої поверхні об'єкта або дефекту 3 і приймається тим самим (або іншим) перетворювачем. Генератор електричних імпульсів 4, 6 синхронізований з генератором розгортки 7 електронно-променевої трубки 5. Відбиті сигнали посилюються і викликають появу на лінії розгортки піків. Зокрема на рис. 1.4 показаний сигнал, що посилюється у виріб 8, ехосигнал від дефекту 9 і донний сигнал 10. Інформативними параметрами в цьому разі є амплітуда та час приходу імпульсів. Засобом порушення і приймання ультразвукових хвиль, як правило, є п'єзоперетворювачі.

9. Сфокусовані пучки заряджених частинок у діагностиці матеріалів застосовують для отримання повної інформації про нанооб'єкти на атомарному рівні. Проведення досліджень різних властивостей матеріалів та об'єктів, структурованих у мікро- і нанорозмірних масштабах, та їх



діагностика є одним із пріоритетних напрямків сучасної науки і техніки. У зв'язку з цим стоїть завдання створення нових видів апаратурних комплексів (АК) і методів, які могли б забезпечити проведення аналізу мікроструктури й елементного складу нових наноматеріалів і нанооб'єктів.

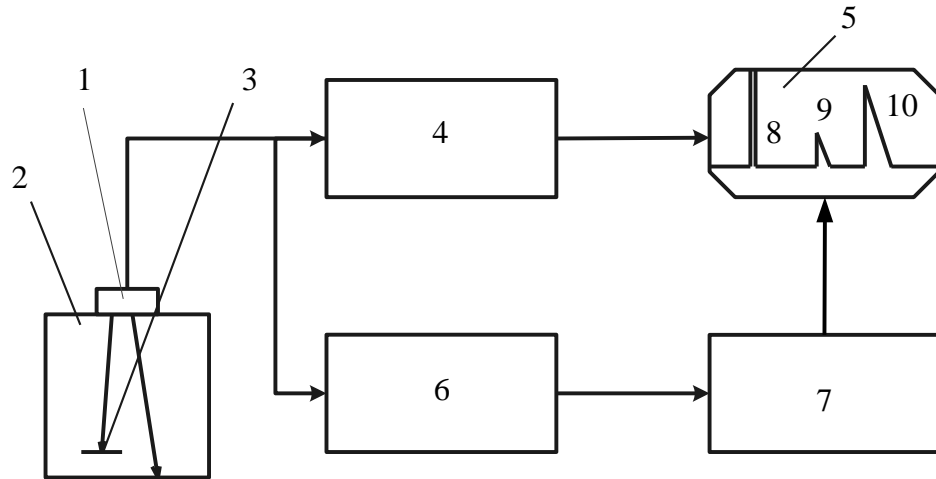


Рисунок 1.4 – Схема імпульсного ультразвукового дефектоскопа

Серед широкого різноманітності фізичних принципів, на основі яких розробляються нові АК, особлива увага приділяється сфокусованим пучкам заряджених частинок. Насамперед це пов'язано з тим, що нижня межа розмірів сфокусованого пучка зараз знаходиться у нанометровому і суб-нанометровому діапазонах. Тому за рахунок детектування продуктів взаємодії частинок пучка з речовиною можна отримувати інформацію про мікроструктуру й елементний склад досліджуваних об'єктів.

## 2. РАДІОХВИЛЬОВА ДІАГНОСТИКА

### 2.1 Загальні питання радіохвильової діагностики

Радіохвильовий неруйнівний контроль базується на реєстрації зміни параметрів НВЧ електромагнітних хвиль радіодіапазону [5–9], що взаємодіють із контрольованим об'єктом. Діапазон довжин хвиль, що зазвичай використовуються в радіохвильовому контролі, становить 1–100 мм (у вакуумі), що відповідає частотам  $3 \cdot 10^{11} - 3 \cdot 10^9$  Гц.

Окремі пристрої радіохвильового контролю можуть працювати на частотах  $f$ , що виходять за межі цього діапазону. Проте найчастіше для неруйнівного контролю використовують трисантиметровий діапазон ( $f \approx 10$  ГГц) і восьмиміліметровий діапазон ( $f \approx 35$  ГГц), які найбільш освоєні та забезпечені елементною базою й вимірювальною апаратурою. Оскільки НВЧ-коливання є поляризованими когерентними гармонічними коливаннями, це обумовлює можливість отримання високої чутливості та достовірності контролю. Радіохвильовий контроль відрізняється великою інформативністю за кількістю параметрів випромінювання, що можна використовувати. Фізичними величинами, які можуть нести корисну інформацію про параметри об'єкта контролю, є: амплітуда, фаза, зсув коливань у часі, спектральний склад, розподіл енергії у просторі, геометричні фактори, поворот площини поляризації, поява амплітудної або частотної модуляції під час руху об'єкта або зміна умов контролю і т. д. Відповідно до цього за первинним інформативним параметром розрізняють такі методи: амплітудний, фазовий, амплітудно-фазовий, геометричний, тимчасовий, спектральний, поляризаційний, голографічний та ін.

Залежно від взаємного розташування випромінювального і приймального пристроїв контроль може проводитися за випромінюванням, що пройшло, коли випромінювач і приймач розташовуються по різні боки від об'єкта; за відбитим випромінюванням, коли випромінювач і приймач розміщуються по один бік від контрольованого об'єкта і реєструється відбита

частина випромінювання, і за розсіяним випромінюванням, коли приймач розташовується в області, де при номінальних параметрах контрольованого виробу інтенсивність випромінювання повинна бути близька до нуля. Радіохвильовим методом можна виробляти всебічний контроль об'єктів із діелектричних і магнітодіелектричних матеріалів, напівпровідникових структур і доступних розмірів металевих виробів.

Як відомо, надвисокочастотне випромінювання порівняно далеко поширюється у вільному просторі, й оператор може потрапити в зону випромінювання. Оскільки НВЧ-випромінювання впливає на біологічні об'єкти, то повинні дотримуватися певні санітарні норми та правила техніки безпеки.

## **2.2 Техніка безпеки при радіохвильовому контролі**

За електричними властивостями тканини тіла людини в НВЧ-діапазоні є недосконалими діелектриками за великої наявності води (до 70 %), а глибина проникнення НВЧ-випромінювання в тіло людини може досягати приблизно 2 см для жирових тканин і 5 мм для м'язових тканин. Тому основний ефект, що визначає шкідливий вплив НВЧ-випромінювання, спостерігається в поверхневому нагріванні тіла людини (шкіри та підшкірної клітковини), що приводить до підвищення температури та зміни кров'яного тиску за рахунок розширення судин. Окремі слабозахищені органи людини є особливо чутливими до НВЧ-випромінювання, наприклад очі мають слабку терморегуляцію та внаслідок тривалого опромінення може з'явитися помутніння кришталика ока, що потребує їх спеціального захисту.

Для діапазону хвиль випромінювань, що застосовується в радіохвильовому контролі, інтенсивність випромінювання електромагнітних хвиль завжди унормована в одиницях щільності потоку потужності. Допустимі рівні опромінення залежно від тривалості впливу електромагнітного випромінювання становлять:  $10 \text{ мкВт/см}^2$  – при опроміненні протягом усього робочого дня,  $100 \text{ мкВт/см}^2$  – при опроміненні

до 2 год за робочий день,  $1000 \text{ мкВт/см}^2$  – при короткочасному опроміненні (до 20 хв за робочий день) із використанням лише захисних окулярів.

*Захист персоналу* від небезпечного впливу НВЧ-опромінення, також як і від інших видів, далеко поширюваних випромінювань, забезпечується шляхом проведення низки заходів: зменшення рівня випромінювання, що виходить від джерела; екранування джерела випромінювання та робочого місця; поглинання електромагнітної енергії; застосування засобів індивідуального захисту.

Найбільш ефективним загальним засобом захисту від НВЧ-випромінювання є екрани з добре провідних матеріалів (алюміній, латунь, сталь та ін.), виготовлених у вигляді листів товщиною 0,5–2 мм або сітки з комірками розміром у кілька міліметрів.

Індивідуальні засоби (захисні окуляри, захисні халати, фартухи та комбінезони, захисні капюшони) використовуються для захисту людини або окремих її органів під час роботи в електромагнітних полях великої інтенсивності, коли інші заходи не можуть забезпечити необхідного ослаблення випромінювання. Захисний одяг шиють із радіотканини, що має переплетені металеві нитки, а захисні окуляри армовані металевою сіткою або мають спеціальне поглинальне покриття.

Під час проведення контролю радіохвильовим методом звичайно досить застосування заходів організаційного характеру та використання поглинального матеріалу з екраном у зоні роботи обладнання. Це дозволяє захистити достатньою мірою персонал, що працює з обладнанням, і усунути забруднення навколишнього середовища.

### **2.3 Основні особливості електромагнітних процесів у НВЧ-діапазоні**

Детально основні положення поширення електромагнітних хвиль у різних середовищах викладені, наприклад, у [17–19] а також в інших літературних джерелах. Зупинимось на загальних поняттях електромагнітних процесів при діагностиці матеріалів.

Оскільки розміри елементів НВЧ-пристроїв і відстані в НВЧ-діапазоні сумірні з довжиною хвилі коливань, електромагнітні процеси, як правило, визначаються накладенням принаймні двох хвиль – падаючої  $\dot{E}_{\text{пад}}$  і відбитої  $\dot{E}_{\text{від}}$ :

$$\dot{E} = \dot{E}_{\text{пад}} + \dot{E}_{\text{від}}, \quad (2.1)$$

причому

$$\dot{E}_{\text{пад}} = \dot{E}_0 e^{-\gamma x}, \quad (2.2)$$

$$\dot{E}_{\text{від}} = \dot{E}_0 \Gamma e^{-\gamma x}, \quad (2.3)$$

де  $\dot{E}_0$  – напруженість поля в зоні джерела;  $\gamma$  – коефіцієнт поширення, що дорівнює

$$\underline{\gamma} = \alpha + j \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad (2.4)$$

$\alpha$  – коефіцієнт загасання коливань уздовж лінії;  $\Gamma$  – коефіцієнт відбиття;  $x$  – відстань у середовищі поширення коливань;  $\Lambda$  – довжина хвилі НВЧ-коливань у загальному випадку.

Електромагнітна хвиля – це поперечна хвиля електричного і магнітного полів, охарактеризувати її можна напруженостями: електричного поля  $\dot{E}$ , магнітного поля  $\dot{H}$  та ін.; у лінії передачі – напругою  $U$ , струмом  $I$ . Усі ці величини пропорційні одна одній (коефіцієнт пропорційності є векторною величиною), тому аналіз електромагнітних процесів можна вести, використовуючи одну з них (найбільш зручно – за напруженістю електричного поля або напругою).

Якщо НВЧ-коливання передаються від джерела до приймача (навантаження), то вздовж лінії поширення (двопровідній, хвилеводу, вільного простору тощо) встановлюється певний періодичний розподіл електромагнітних величин (напруженостей електричного  $\dot{E}$  і магнітного полів  $\dot{H}$ , густини енергії і т. д.), що залежить від довжини хвилі та

параметрів середовища поширення (2.2) – (2.4). Довжина хвилі  $\Lambda = \lambda$  у необмеженому середовищі дорівнює

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \frac{c}{f}, \quad (2.5)$$

де  $c$  – швидкість світла у вакуумі;  $\epsilon$  – відносна діелектрична проникність середовища;  $\mu$  – відносна магнітна проникність середовища.

Якщо взяти  $\epsilon = 1$  і  $\mu = 1$ , то з (2.5) отримуємо довжину хвилі у вакуумі, що широко використовується при аналізі процесів у НВЧ-діапазоні.

Основним показником, що характеризує довгу лінію передачі або середовище, є хвильовий опір (імпеданс), який для монохроматичного коливання визначається за формулою

$$\dot{Z} = \dot{E} / \dot{H}, \quad (2.6)$$

де  $\dot{E}$ ,  $\dot{H}$  – напруженості компонент електричного та магнітного полів відповідно.

Якщо НВЧ-коливання поширюються в якомусь середовищі, то хвильовий опір (2.6) може бути знайдений так:

$$\dot{Z} = \sqrt{\dot{\mu}_a / \dot{\epsilon}_a}, \quad (2.7)$$

де  $\dot{\mu}_a$  – комплексне значення абсолютної магнітної проникності середовища:

$$\dot{\mu}_a = \dot{B} / \dot{H} = \dot{\mu} \mu_0; \quad (2.8)$$

$\dot{\epsilon}_a$  – комплексне значення абсолютної діелектричної проникності середовища:

$$\dot{\epsilon}_a = \dot{D} / \dot{E} = \epsilon \epsilon_0 - j \frac{\sigma}{\omega}, \quad (2.9)$$

$\dot{B} = \dot{\mu}_a \dot{H}$ ,  $\dot{D} = \dot{\epsilon}_a \dot{E}$  – індукція компонент електричного та магнітного полів відповідно;  $\mu_0$  – магнітна стала, що дорівнює  $1/36 \pi \cdot 10^{-9}$  Ф/м;  $\sigma$  – питома електрична провідність середовища, См/м;  $\omega$  – колова частота НВЧ-коливань, рад/с.

Часто використовують величину, що називається тангенсом кута діелектричних втрат, яку зручно застосовувати при аналізі процесів у діелектриках:

$$\operatorname{tg} \delta = \sigma / (\omega \epsilon \epsilon_0). \quad (2.10)$$

Хвильовий опір (2.6), (2.7) діелектричних неферомагнітних матеріалів менший, ніж хвильовий опір вакууму ( $Z = 377 \text{ Ом}$ ), а у феромагнітних діелектриків може бути більшим за нього.

Провідні матеріали мають дуже малий за модулем хвильовий опір, що визначається питомою електричною провідністю  $\sigma$  ( $\epsilon$  можна знехтувати) і магнітною проникністю  $\mu \approx 1$ , аргумент імпедансу близький до  $45^\circ$ , тобто дійсна й уявна частини хвильового опору рівні. Для напівпровідникових матеріалів – феритів і недосконалих діелектриків – хвильовий опір має проміжне значення щодо металів та діелектриків і різні співвідношення між дійсною й уявною частинами.

Розподіл напруженості електричного поля (або пропорційного йому напруги) уздовж двопровідної або хвилевідної довгої лінії в різних режимах, кожен із яких задається співвідношенням між падаючою та відображеною хвилями (2.1), що йдуть від джерела та навантаження, показаний на рис. 2.1.

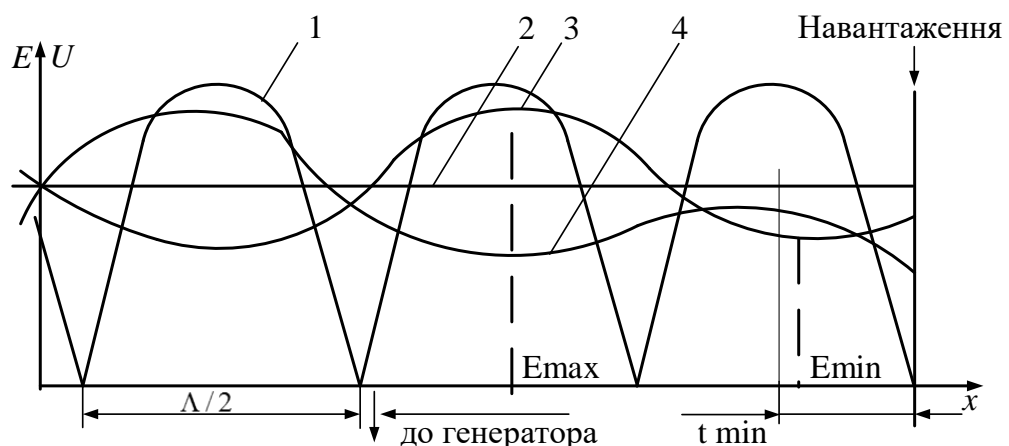


Рисунок 2.1 – Поширення НВЧ-коливань у різних режимах:

1 – стояча хвиля; 2 – біжуча хвиля; 3 – загальний випадок; 4 – лінія зі втратами

У каналах радіохвильової апаратури зазвичай намагаються отримати режим біжучої хвилі, коли амплітуда напруг та струмів по довжині тракту стала і відбувається найбільш повна передача НВЧ-енергії в навантаження (рис. 2.1).

Режим біжучої хвилі (узгоджений режим) досягається, якщо опір навантаження  $Z_n$  дорівнює хвильовому опору лінії  $Z_\lambda$  (2.7) і характеризується тим, що модуль напруженості електричного та магнітного полів уздовж лінії сталий. Якщо лінія і навантаження не мають втрат ( $Z_n = 0$ ,  $Z_n = \infty$  або  $Z_n$  – чисто реактивне), то виникає режим стоячої хвилі, коли модулі падаючої та відбитої хвиль однакові. Тому в точках, віддалених на  $\Lambda/2$ , досягаються нульові значення напруженості електричного або магнітного поля (рис. 2.1). У загальному випадку ( $Z_n \neq Z_\lambda$ ) напруженість електричного поля буде періодично змінюватися від максимального до мінімального значення (рис. 2.1), причому зсув мінімуму від кінця лінії характеризуватиме реактивну складову опору навантаження, а перепад між максимумом і мінімумом залежить від активної складової.

На практиці для аналізу процесів у лінії передачі найчастіше використовують поняття коефіцієнта біжучої хвилі (КБХ) або коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ):

$$\begin{aligned} \text{КБХ} &= \left| \frac{\dot{E}_{\min}}{\dot{E}_{\max}} \right|, \\ \text{КСХ} &= \left| \frac{\dot{E}_{\max}}{\dot{E}_{\min}} \right|, \end{aligned} \quad (2.11)$$

де  $|\dot{E}_{\min}|$  і  $|\dot{E}_{\max}|$  – модулі мінімальної та максимальної напруженостей електричного поля (див. рис. 2.1). Крім того, використовується поняття фази коефіцієнта відбиття хвилі, що однозначно задається навантаженням. Практично ця величина визначається відстанню від навантаження до точки мінімуму:

$$\Psi = 2\pi \left( \frac{1}{4} - \frac{l_{\min}}{\Lambda} \right). \quad (2.12)$$



Коефіцієнт відбиття (2.3) може бути знайдений за відомим КБХ або КСХ.

## 2.4 Загальні питання побудови апаратури радіохвильового контролю

У контрольованих об'єктах, як правило, можуть бути доступними одна або дві поверхні, що визначає можливість застосування контролю лише за відбитим або за відбитим і прохідним випромінюваннями. Контроль за прохідним випромінюванням вимагає більш широкого простору, але кращий, оскільки можливе істотне зниження впливу переміщень контрольованих об'єктів між антенами випромінювальними та приймальними. Найбільш детальну інформацію про контрольований об'єкт дає застосування багатoeлементних антен, що вирішують завдання контролю внутрішньої будови об'єкта [1; 9].

Завдання структуроскопії, товщинометрії та дефектоскопії можна вирішувати за допомогою використання одно- та багатоканальних пристроїв (рис. 2.2 у варіанті радіохвильового контролю за прохідним випромінюванням).

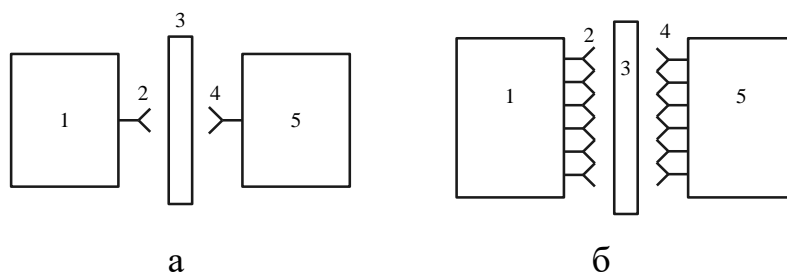


Рисунок 2.2 – Схеми радіохвильового контролю: а – одноканального; б – багатоканального (1 – НВЧ-генератор, 2 – випромінювальні системи, 3 – контрольований об'єкт, 4 – приймальна система, 5 – блоки обробки сигналів)

Вибір робочої частоти (трисантиметрового або восьмиміліметрового діапазону) обумовлений як загальними вимогами щодо розв'язуваної контрольно-вимірювальної задачі (геометричні розміри, необхідна роздільна

здатність апаратури, зона контролю і т. д.), так і значеннями електромагнітних параметрів на даній робочій частоті.

Оскільки НВЧ-коливання в міру проникнення вглиб матеріалу контрольованого об'єкта зменшуються за амплітудою, відбиті сигнали зі збільшенням товщини зменшуються, і, починаючи з деякої товщини, контроль стає важким. Оцінку загасання НВЧ-коливань можна провести, визначивши глибину проникнення НВЧ-поля для плоскої хвилі з виразу [17]:

$$\delta = \sqrt{2/(\mu\mu_0\sigma\omega)}, \quad (2.13)$$

а потім урахувати, що хвиля близька до циліндричної або сферичної та сигнали будуть додатково знижуватися за рахунок геометричного фактора.

Великою галуззю застосування радіохвильового методу є контроль фізичних величин, що характеризують матеріал або його стан. За необхідності отримати підвищену точність вимірювання фізичних величин застосовують двоканальні прилади типу інтерферометрів у поєднанні з компенсаційними способами вимірювань. Найбільшого поширення набули пристрої для вимірювання щільності матеріалів на основі вимірів діелектричної проникності, вологості матеріалів і покриттів, оцінки механічних характеристик композиційних матеріалів, напівфабрикатів і виробів.

## **2.5 Особливості взаємодії радіохвильового випромінювання з об'єктами контролю**

Контрольований об'єкт, приймальний та випромінювальний пристрої при радіохвильовому контролі знаходяться, як правило, у ближній зоні, де структура електромагнітного поля носить складний характер і строгий аналіз неможливий.

Тому питання взаємодії об'єктів контролю з електромагнітним НВЧ-полем вирішуються експериментально або наближеними методами. Якщо відстані між кордонами різних середовищ сумірні або на багато

більшіпорівняно з довжиною хвилі НВЧ-коливань у матеріалі, а кожна із середовищ однорідна, використовують закони геометричної оптики. При цьому вважають, що в межах однорідного середовища НВЧ-випромінювання поширюється прямолінійно і напрямки падаючої, відбитої та заломленої хвиль (у всіх середовищах 1–3) лежать в одній площині (у площині креслення на рис. 2.3) і тоді справедливі такі співвідношення, що виконуються незалежно від поляризації падаючої хвилі [1, 9].

При відбитті радіохвилі від межі розділу двох середовищ кут падіння дорівнює куту відбиття, тобто  $\theta = \theta_0$ . Промінь, що пройшов у інше середовище, заломлюється на межі розділу середовищ так, що кут падіння і кут заломлення пов'язані виразами

$$\sin \theta / \sin \theta_n = N, \quad N = n_2 / n_1, \quad n_{1,2} = \sqrt{\mu_{1,2} \varepsilon_{1,2}}, \quad (2.14)$$

де  $N$  – відносний коефіцієнт заломлення;  $n_1, n_2$  – коефіцієнти заломлення середовища 1 і 2 відповідно.

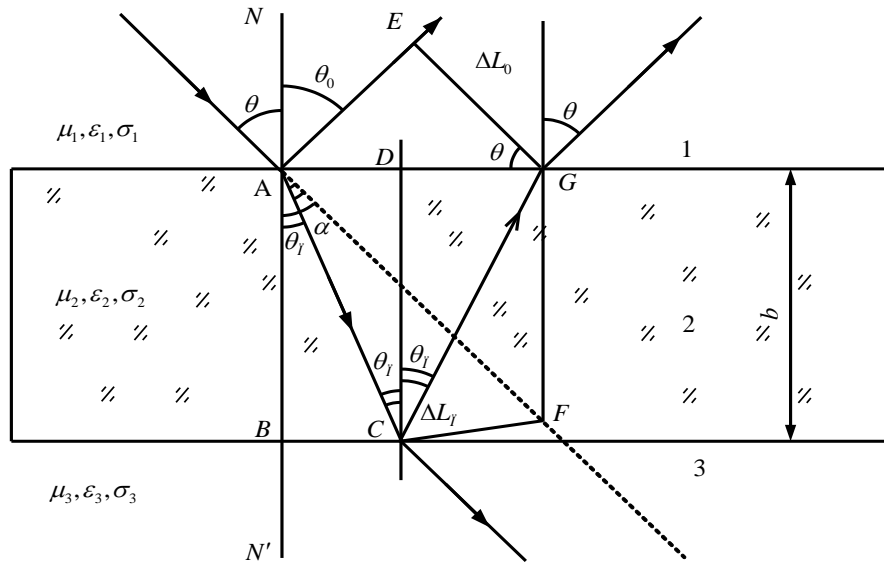


Рисунок 2.3 – Взаємодія випромінювання з пластиною

Із виразу (2.15) можна отримати

$$\theta_n = \arcsin \left( \frac{\sin \theta}{N} \right). \quad (2.15)$$

Складова поля у відбитій і заломленій хвилях залежить як від параметрів середовищ, так і від поляризації падаючої хвилі. Напруженість електричного поля характеризує коефіцієнти відбиття та заломлення хвиль:

$$\underline{K}_e = \dot{E}_{\text{від}} / \dot{E}_{\text{пад}}, \quad \underline{K}_z = \dot{E}_{\text{пр}} / \dot{E}_{\text{пад}}. \quad (2.16)$$

Коефіцієнти відбиття і заломлення (2.16) для різних варіантів положення вектора напруженості електричного поля можуть бути розраховані, якщо відомі імпеданс (хвильові опори) середовищ. Якщо вектор напруженості електричного поля лежить у площині падіння, то

$$K_e'' = \frac{Z_2 \cos \theta_n - Z_1 \cos \theta}{Z_2 \cos \theta_n + Z_1 \cos \theta}, \quad (2.17)$$

$$K_z'' = \frac{2Z_2 \cos \theta_n}{Z_2 \cos \theta_n + Z_1 \cos \theta}. \quad (2.18)$$

Якщо вектор напруженості електричного поля перпендикулярний до площини падіння, то

$$K_e^\perp = \frac{Z_2 \cos \theta - Z_1 \cos \theta_n}{Z_2 \cos \theta + Z_1 \cos \theta_n}, \quad (2.19)$$

$$K_z^\perp = \frac{2Z_2 \cos \theta}{Z_2 \cos \theta + Z_1 \cos \theta_n}. \quad (2.20)$$

Оскільки між векторами напруженості електричного та магнітного полів існує однозначний зв'язок, то

$$\dot{E} = -Z\bar{n} \times \dot{H},$$

де  $\bar{n}$  – одиничний вектор нормалі.

Знаючи коефіцієнт відбиття або заломлення, можна визначити компоненти електромагнітного поля в будь-якому із середовищ. Деякі окремі випадки, реалізовані в апаратурі радіохвильового контролю, розглянуті в [1, 9].

## 2.6 Елементна база та основні пристрої апаратури радіохвильового контролю

### 2.6.1 Джерела надвисокочастотних коливань

Основними джерелами НВЧ-коливань є напівпровідникові та електронні генератори [20, 21].

Як напівпровідникові генератори використовують лавинно-пролітні діоди, діоди Ганна, тунельні діоди та ін. Основні їх переваги: малі габарити, маса та споживана потужність. Недолік – низька стабільність характеристик і великі шуми.

Електронні генератори НВЧ-коливань [21] будуються на базі клістронів, ламп біжучої та зворотної хвиль, магнетронів. У радіохвильовій апаратурі основне застосування знайшли клістронні генератори потужністю 5-20 мВт. Їх недоліком є необхідність високого за напругою стабілізованого живлення і, як наслідок, великі габарити та маса.

Як приклад схематично розглянемо принцип дії та побудови НВЧ-генераторів на основі лавинно-пролітного діода (ЛПД) і клістрона, функціональні схеми яких зображені на рис. 2.4.

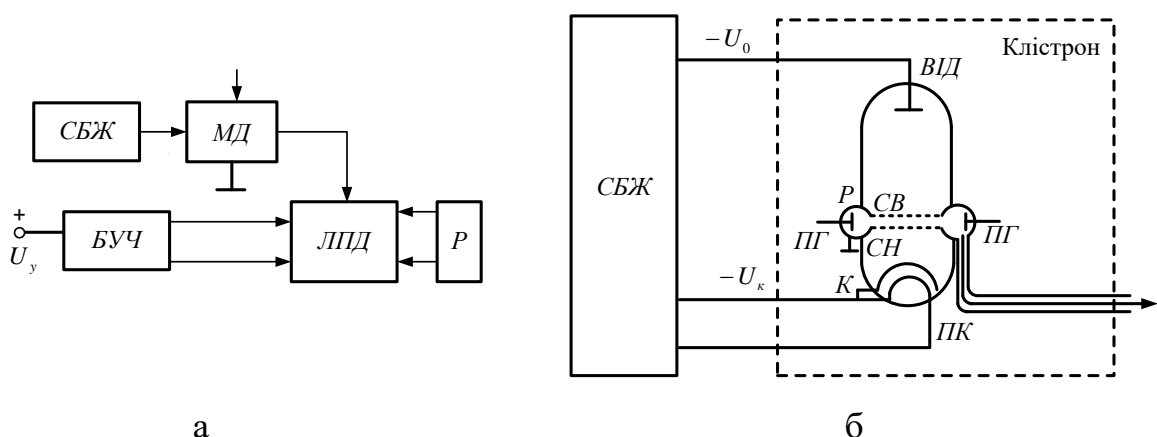


Рисунок 2.4 – Функціональні схеми НВЧ-генераторів на ЛПД (а) і відбивному клістріні (б)

Генератор на лавинно-пролітних діодах, функціональна схема якого зображена на рис. 2.4 а, складається з таких великих блоків: ЛПД, резонатора

Р, стабілізованого блока живлення СБЖ, модулятора МД, блока управління частотою БУЧ. ЛПД і Р, як правило, конструктивно поєднуються, щоб не було додаткових набігів фаз і нестабільностей, що визначаються особливостями НВЧ-діапазону. Саме ці два блоки забезпечують створення НВЧ-коливань. СБЖ задає робочий режим ЛПД за постійним струмом, а МД і БУЧ дають можливість за необхідності здійснювати амплітудну модуляцію (найчастіше прямокутними імпульсами із частотою 1 кГц) і зміну частоти. Лавинно-пролітний діод – це спеціальний напівпровідниковий діод, призначений для роботи в НВЧ-діапазоні. Напруга живлення ( $U_n = 10 - 150$  В залежно від типу діода) подається через дросель у зворотному напрямку, а робоча область генерації НВЧ-коливань лежить у зоні електричного пробою. Паралельно ЛПД увімкнений резонатор Р, налаштований на частоту генерації. ЛПД у динамічному режимі має негативний опір і компенсуватиме втрати енергії, підтримуючи НВЧ-коливання в резонаторі. Енергія НВЧ-коливань виводиться з резонатора за допомогою петлі зв'язку.

Стабілізований блок живлення СБЖ є джерелом постійної напруги, що не залежить від варіацій напруги живильної мережі та навантаження. Він побудований за типовою схемою і містить трансформатор Тр, випрямляч В, фільтр Ф і стабілізатор СТ із великим коефіцієнтом стабілізації для захисту діода від теплового пробою і стабілізації НВЧ-коливань.

Модулятор МД може бути виконаний у вигляді керованого електронного ключа, що подає живлення на ЛПД у необхідні моменти часу.

Генератор на відбивному клістріні, функціональна схема якого наведена на рис. 2.4 б, має блоки, аналогічні напівпровідниковому НВЧ-генератору. Відбивний клістрон КЛ – це спеціальна електронно-вакуумна лампа, що має катод К із підігрівачем ПК, дві сітки СВ і СН, що з'єднуються з об'ємним резонатором Р, і відбивач ВІД. Блок живлення СБЖ створює необхідні живлячі напруги.

Частоту НВЧ-коливань клістронного генератора можна регулювати так само, як і в генераторі на ЛПД, змінюючи резонансну частоту резонатора Р за

допомогою налаштування підстроюваних гвинтів ПГ (перебудова на 10-20 %) або змінюючи постійні напруги на електродах (відбивачі) клістрона (перебудова до 1 %), а щоб отримати модульовані за амплітудою або частотою НВЧ-коливання, на відбивач ВІД клістрона подають пульсуючу напругу.

### **2.6.2 Основні пристрої для формування та обробки НВЧ-сигналів і полів**

До таких пристроїв належать: випромінювальні та приймальні пристрої, атенюатори, вентиля, фазообертачі, спрямовані відгалужувачі, детекторні секції, трійники, резонатори, узгоджені навантаження, відрізки хвилеводів спеціальної форми, вимірювальні лінії та хвилеміри. Більшість цих НВЧ-пристроїв, що використовуються в неруйнівному контролі, побудовані на базі хвилеводів, що характерно для трисантиметрового і восьмиміліметрового діапазонів НВЧ [17, 20].

Випромінювальні та приймальні пристрої (антени), що застосовуються при радіохвильовому контролі, можуть бути виконані у вигляді рупора, відкритого зрізу хвилеводу, щілин або хвилеводу з діелектричною вставкою (рис. 2.5), що визначається необхідною локальністю контролю, необхідною чутливістю апаратури й особливостями конкретного завдання. Так, наприклад, випромінювач і приймач у вигляді рупора (рис. 2.5 а) дають хороше узгодження хвилевідного тракту із зовнішнім простором і контрольованим об'єктом, що забезпечує великі амплітуди сигналів, але призводить до погіршення локальності контролю. Застосування щілинного пристрою у вигляді звужувального хвилеводу (рис. 2.5 г), навпаки, підвищує локальність контролю, якщо контрольований об'єкт знаходиться безпосередньо біля щілини, але при цьому виникають значні відбиття НВЧ-коливань від вузького зрізу, що знижує чутливість апаратури та призводить до маскуванню корисного сигналу.

При видаленні об'єкта від антени зона опромінення розширюється у вигляді конуса, кут розкриття якого тим більший, чим менші розміри антени,

тобто приблизно відповідає ширині її діаграми спрямованості. Зона, де відбувається випромінювання НВЧ-коливань, у випромінювачів і приймачів найчастіше заповнюється діелектричними вставками, що покращують роботу цих пристроїв, а також перешкоджають проникненню в них сторонніх предметів і різних забруднень. На основі показаних на рис. 2.5 пристроїв можуть створюватись і складніші випромінювальні та приймальні пристрої, наприклад двохелементні, що реалізують метод самопорівняння в дефектоскопії, або у вигляді багатоелементних антенних решіток. Як випливає з принципу взаємності, один і той самий пристрій може використовуватися як випромінювальний або приймальний.

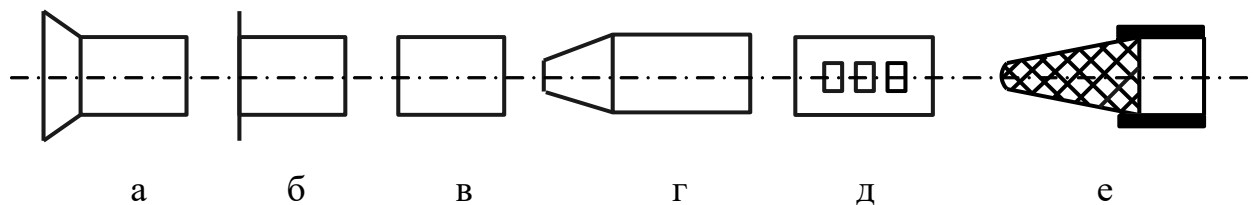


Рисунок 2.5 – Типи випромінювальних і приймальних пристроїв, що використовуються в радіохвильовому контролі: а – рупор; б – фланець хвилеводу; в – зріз хвилеводу; г – звужувальний кінець хвилеводу; д – щілини; е – хвилевід із діелектричною вставкою

Каналізуючі пристрої хвилеводу або відрізки коаксіальних ліній із різними поперечними перерізами передають енергію НВЧ-коливань від генератора і випромінювача або від приймального пристрою до первинного вимірювального перетворювача. Коаксіальні лінії (рис. 2.6 а) використовуються при передачі НВЧ-енергії на короткі відстані. Смугові лінії (рис. 2.6 б, в) добре поєднуються із сучасною друкованою технологією виробництва радіоелектронної техніки. Частіше за інших у пристроях радіохвильового контролю застосовують прямокутні хвилеводи, а іноді – круглі. В області короткохвильового НВЧ-діапазону (восьмиміліметрового і коротше) можуть бути використані діелектричні хвилеводи та пристрої на їх основі (рис. 2.6 є).



*Атенюатор* (ослаблювач) служить для дискретного або плавного регулювання амплітуди НВЧ-сигналів шляхом зміни розмірів поперечного перерізу хвильоводу, введення вставок, в яких загасають НВЧ-коливання, або шляхом використання поляризаційних особливостей НВЧ-коливань.

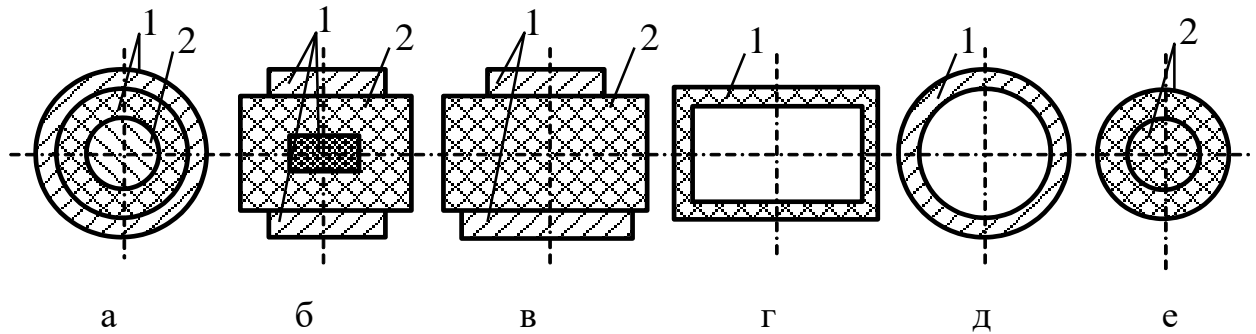


Рисунок 2.6 – Поперечні перерізи основних типів каналізуючих НВЧ-пристроїв: а – коаксіальна лінія; б – симетрична смугова лінія; в – несиметрична смугова лінія; г – прямокутний хвильовід; д – круглий хвильовід; е – діелектричний хвильовід (1 – метал; 2 – діелектрик)

*Вентиль* пропускає НВЧ-енергію лише в одному напрямку, тобто лише падаючу хвилю, що необхідно для роботи НВЧ-тракту в режимі біжучої хвилі та усунення впливу навантаження на джерело коливань.

*Фазообертач* дає можливість змінити фазу НВЧ-коливань на фіксоване значення дискретно або плавно й становить відрізок довгої лінії регульованої довжини або зі змінними електричними параметрами середовища ( $\mu$  або  $\epsilon$ ), що дозволяє регулювати електричну довжину відрізка та приводить до додаткового набігу фази, який залежить від відношення електричної довжини відрізка до довжини хвилі.

*Спрямований відгалужувач* має один вхід і два або більше виходів, на які передає певну частину лише падаючої або відбитої хвилі в потрібний хвильовід НВЧ-тракту. Він може використовуватися як дільник потужності в певній пропорції, а також для додавання або віднімання сигналів.

*Детекторна секція* (амплітудний детектор, випрямляч) перетворює НВЧ-коливання в сигнали постійного струму або в сигнали, пропорційні обвідної НВЧ-коливань. Вона виконується на базі НВЧ випрямного пристрою з напівпровідниковим діодом. Для збільшення значень вихідних сигналів детекторна секція зазвичай містить резонаторну частину, що налаштовується спеціальним поршнем у режим резонансу на робочій частоті. В апаратурі з аналоговою обробкою сигналу до детекторної секції, як правило, підключають чутливий мікроамперметр, підсилювач або реєструвальний прилад.

*Змішувальна секція* подібна детекторній, але має два входи, до яких підводяться НВЧ-коливання двох різних частот. Унаслідок їх накладення і випрямлення на виході змішувальної секції виділяється складова коливань різницевої частоти, яка набагато менша за частоту НВЧ-коливань і обробка сигналів на якій проводиться набагато простіше.

*Трійники* мають три або більше хвилевідних відгалужень і служать для поділу потоку НВЧ-енергії або, навпаки, для підсумовування (віднімання) НВЧ-коливань. В апаратурі радіохвильового контролю використовують Е-трійник, Н-трійник і подвійний трійник (стрілками на рис. 2.7 показано напрям вектора напруженості електричного поля).

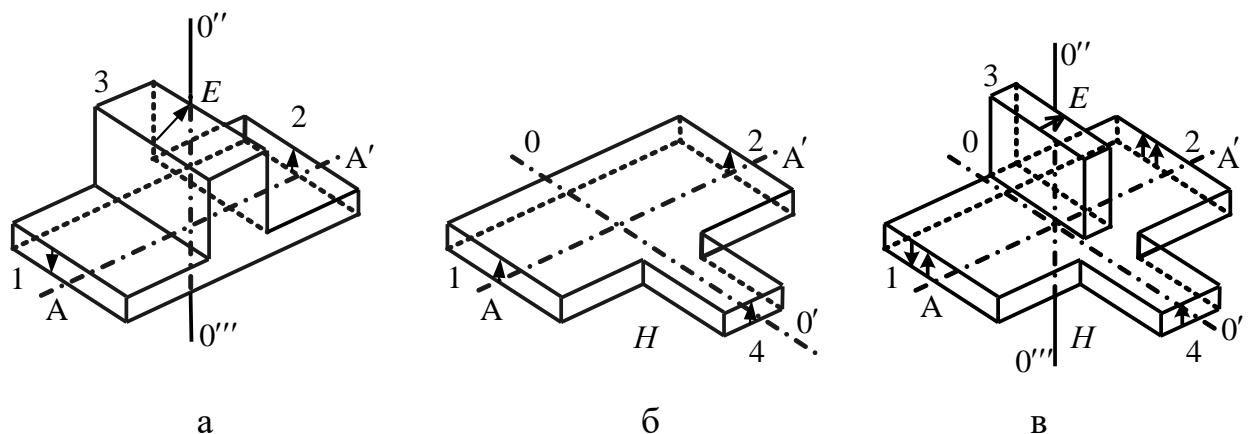


Рисунок 2.7 – Хвилевідні НВЧ-трійники: а – Е-трійник; б – Н-трійник; в – НВЧ-міст (подвійний трійник)

*Резонатори*, по суті, є резонансними контурами, та з їх допомогою можна виконувати ті самі перетворення сигналів, що й за допомогою резонансних контурів: виділяти коливання необхідної частоти, погоджувати різні елементи між собою, змінювати значення струмів або напруг і т. д. Резонатори можуть виконуватись у вигляді об'ємних конструкцій або відрізків хвилеводів і довгих ліній. Перебудова НВЧ-резонаторів проводиться за допомогою штирів, плунжерів, короткозамикальних поршнів, пластин і гнучких діафрагм.

*Узгоджені навантаження* призначені для підключення до НВЧ-тракту, щоб поглинути падаючу хвилю й усунути тим самим відбиття НВЧ-коливань. Вони виконуються у вигляді відрізка довгої лінії, що має активний опір, що дорівнює опору лінії ( $Z_H = Z_L$ ).

*Вимірювальні лінії* – це відрізок довгої лінії з прорізом для введення зонда детекторної секції. У проріз відрізка довгої лінії вводять зонд, який може бути переміщений уздовж лінії, що дозволяє поміщати його в місце, де досягається необхідне співвідношення між падаючою і відбитою хвилями та відповідно виходять певні значення НВЧ-коливань (максимум, мінімум, середнє). Вимірювальна лінія має точне градування та дозволяє вимірювати багато величин, що характеризують НВЧ-коливання.

*Хвилеміри* – пристрої для визначення частоти або довжини хвилі НВЧ-коливань (у простому випадку – це короткозамкнена вимірювальна лінія з каліброваними розмірами елементів). Наприклад, для часто використовуваного прямокутного хвилеводу при збудженні в ньому хвилі типу  $H_{10}$  довжина хвилі дорівнює

$$\Lambda_x = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_x - (\lambda_0 / 2a)^2},$$

де  $\lambda_0 = c/f$  – довжина хвилі у вакуумі;  $\epsilon_x$  – відносна діелектрична проникність речовини, що заповнює хвилевід;  $a$  – розмір широкої стінки хвилеводу.

### 2.6.3 Індикатори та перетворювачі радіохвильового випромінювання

Індикатори НВЧ-випромінювання перетворюють розподіл густини НВЧ-енергії у видиме зображення, що дозволяє оператору аналізувати якість контрольованого об'єкта. При радіохвильовому контролі як індикатори зазвичай використовують люмінофори та рідкі кристали, а реєстрація інтенсивності НВЧ-випромінювання найчастіше базуються на його перетворенні в низькочастотні або постійні електричні сигнали.

*Люмінофори* – це речовини, що володіють властивістю світитися при впливі на них певних видів випромінювання, що збуджують люмінофор в оптичній частині випромінювання. Це видиме випромінювання сприймає оператор. Проте енергія квантів НВЧ-випромінювання недостатня для збудження люмінофора, тому для її порушення виробляється додаткове опромінення речовини люмінофора від спеціального джерела із квантами, що мають велику енергію, наприклад лампою, яка випромінює ультрафіолетове світло. Інтенсивність випромінювання допоміжного джерела встановлюють таким чином, щоб яскравість світіння люмінофора була середньою. Тоді при впливі НВЧ-випромінювання умови роботи люмінофора будуть змінюватися, й яскравість світіння залежатиме від падаючої на люмінофор НВЧ-енергії, що дозволить спостерігати її розподіл у просторі.

*Рідкі кристали* мають молекулярну структуру, проміжну між рідиною (володіють текучістю) і твердим тілом (аномальні оптичні властивості). Для цілей неруйнівного контролю застосовують холестеричні рідкі кристали. Тонкий шар рідкого кристала залежно від його температури та кута спостереження має найбільший коефіцієнт відбиття для світла певної довжини хвилі. Тому, якщо висвітлювати плівку на основі рідкого кристала білим світлом і фіксувати кут спостереження, при зміні температури можна отримати максимум інтенсивності відображення для різних кольорів – компонентів білого світла. Щоб поліпшити умови спостереження, рідкий кристал наноситься на плівку із зачорненою основою, що підвищує контрастність зображення й усуває перешкоди за рахунок вторинного

відображення. Під час проведення контролю плівку накладають на контрольований об'єкт і за кольоровим забарвленням оператор робить висновки про температуру в тій чи іншій частині об'єкта, зумовленої нагріванням його НВЧ-випромінювання. Чутливість неруйнівного контролю за допомогою рідких кристалів при інших рівних умов визначається кількістю градацій кольору, які розрізняє оператор. Для деяких рідких кристалів на основі холестерину забарвлення відбитого світла змінюється по всьому спектру від червоного до фіолетового при зміні температури на 1–3 К, що дає можливість оцінювати роздільну здатність проведення контролю з їх допомогою 0,1–0,2 К. Порівняно з іншими термоіндикаторами рідкі кристали особливо ефективні, коли необхідно відрізнити малі градієнти температур при невисоких температурах (283–393 К).

*Вимірювальні перетворювачі* (первинні вимірювальні перетворювачі, датчики) виробляють перетворення компонентів НВЧ-випромінювань і полів в електричні сигнали, зручні для подальшої обробки. Як первинні вимірювальні перетворювачі застосовують: напівпровідникові та термоелектричні прилади. Напівпровідникові прилади (НВЧ-діоди та транзистори) побудовані на базі  $p-n$ -переходу і за рахунок його нелінійних властивостей дають можливість перетворити НВЧ-коливання в сигнали постійного струму, відеосигнали або сигнали більш низької частоти (перетворення частоти). При випрямленні НВЧ-коливань отримують відеосигнали або сигнали низької частоти (виділення обвідної НВЧ-коливань) і сталу складову випрямленої струму, що використовується для безпосередньої індикації сигналів магнітоелектричними мікроамперметрами. Коли напівпровідникові діоди використовуються як змішувач для перетворення частоти, обвідна НВЧ-коливань і їх фаза переносяться на знижену несучу (різницеву) частоту, обробка сигналу проводиться радіоелектронною технікою, що має кращі технічні та метрологічні показники. В апаратурі радіохвильового контролю найбільше застосування отримали НВЧ-діоди. Термоелектричні прилади (терморезистори, термістори

і болометри) використовують теплову дію НВЧ-енергії, тому їх виготовляють із матеріалів, що добре перетворюють теплові зміни в електричні сигнали.

*Напівпровідниковий НВЧ-діод* – це точковий діод, спеціально призначений для застосування в НВЧ-діапазоні. Його конструкцію найчастіше виконують у вигляді коаксіальних форм із товстими і короткими елементами – виведеннями, зручними для монтажу та електричного з'єднання з каналізуючими НВЧ-пристроями (хвильоводами, довгими лініями). Враховуючи, що НВЧ-діод та елементи секції (зазвичай параметри НВЧ-діодів задають разом із хвилевідною секцією) мають паразитні індуктивності та ємності, що обмежують його можливості, для кожного діода вказують робочий діапазон довжин хвиль і найбільше значення КБХ, одержуване під час його використання. Напівпровідникові діоди порівняно з іншими первинними вимірювальними перетворювачами НВЧ-енергії відрізняють висока швидкодія, велика чутливість і простота використання. Їх недолік – невисокі метрологічні характеристики і погана перевантажувальна здатність.

*Терморезистор* – нелінійний напівпровідниковий резистор, опір якого сильно залежить від температури. Терморезистори виконують з напівпровідникового матеріалу складного складу з температурним коефіцієнтом до 6 % на 1 К. Для роботи в НВЧ-діапазоні застосовують вимірювальні терморезистори (термістори), що дозволяють проводити вимірювання потужності від часток мікровата до декількох міліватів. Властивості терморезистора описують дві характеристики: температурна  $R(T)$  – залежність опору від температури і вольтамперна  $U(I)$ . Оскільки НВЧ-енергія в терморезисторі перетворюється в теплову, терморезистор характеризують температурним коефіцієнтом і сталою часу, яка порівняно з діодами виявляється великою, що й обмежує галузі їх застосування.

*Болометри* – спеціально виконані резистори з провідникового або напівпровідникового матеріалу, призначені для виявлення та вимірювання надзвичайно малих потоків потужності. Порівняно з іншими

терморезисторами болометри відрізняє більш висока стабільність характеристик (металеві болометри), але разом із тим – знижені температурні коефіцієнти. Їх так само, як НВЧ-діоди, виготовляють парами, причому розташовують поряд і один із них екранують від випромінювання.

#### **2.6.4 Одноканальні методи радіохвильового контролю**

Одноканальні пристрої радіохвильового контролю прохідного випромінювання застосовують у тих випадках, коли можливий двосторонній доступ до зовнішніх кордонів контрольованого об'єкта. У найпростішому варіанті такого контролю в приймальному тракті забезпечують режим біжучої хвилі та вимірюють амплітуду отриманого НВЧ-сигналу. Недоліками такого методу контролю є сильна залежність сигналу від рівня випромінювання і мала чутливість. Тому апаратуру з кращими метрологічними характеристиками виконують з використанням балансних або мостових схем.

Вимірювач, функціональна схема якого показана на рис. 2.8, може бути використаний для однопараметрового контролю товщини або властивостей тонких листових матеріалів. У цьому вимірнику за рахунок вимірювання величини, пов'язаної з відношенням потужності прохідної та падаючої хвиль, результат контролю не залежить від невеликих варіацій вихідної потужності генератора. Його перетворювальна частина виконана на базі двох відкритих кінців хвилеводів  $X_1$  і  $X_2$ , захищених чвертьхвильовими кільцевими прорізами  $КП_1$  і  $КП_2$ , у проміжку між якими міститься об'єкт  $КО$ , що контролюється. Показання логометра  $ЛГ$ -приладу, що вимірює відношення струмів, пропорційних прохідному випромінюванню, і відгалуженим напрямленим відгалужувачем  $НВ$ , не залежить від потужності, що подається від генератора  $Г$  через атенюатор  $А$  і визначається лише властивостями контрольованого об'єкта, що особливо істотно при радіохвильовому контролі об'єктів із різними відбивними характеристиками та при зміні вихідної потужності НВЧ-генератора.

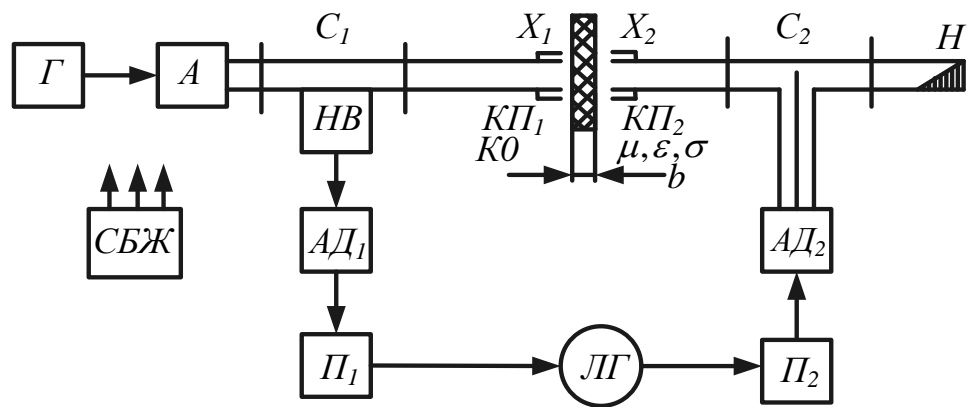


Рисунок 2.8 – Функціональна схема пристрою одноканального радіохвильового контролю

Вимірювач, побудований відповідно до схеми рис. 2.8, має невисоку чутливість через погане узгодження хвильоводів  $X_1$  і  $X_2$  та посилення сигналів постійного струму, обмеженого дрейфом. Крім того, цей вимірювач не дозволяє виробляти роздільний контроль параметрів контрольованого об'єкта.

### 2.6.5 Двоканальні методи радіохвильового контролю

Підвищену чутливість має двоканальний пристрій із посиленням зі змінного струму, функціональна схема якого зображена на рис. 2.9 [1].

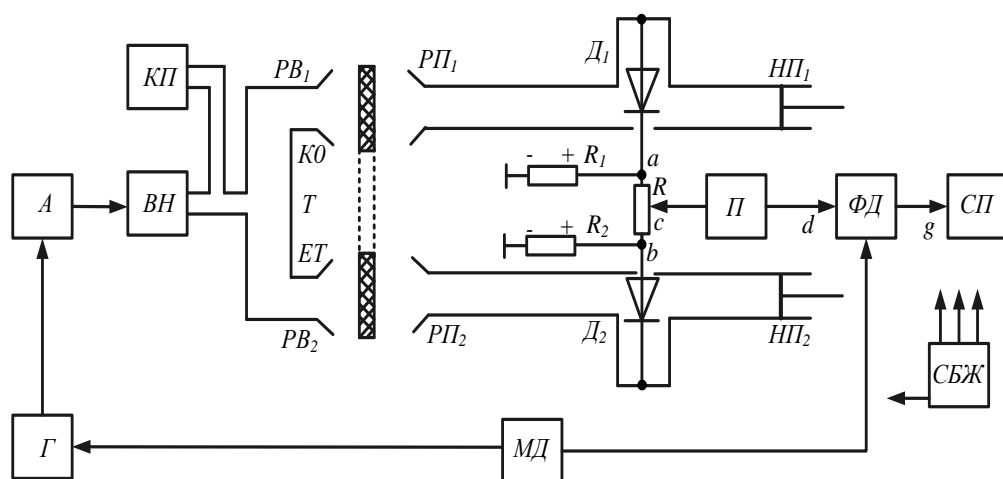


Рисунок 2.9 – Функціональна схема двоканального пристрою радіохвильового контролю



Джерелом НВЧ-коливань у ньому є генератор  $G$ , що живиться від блока живлення  $СБЖ$  і модулятора  $МД$ , який створює прямокутну напругу з частотою 1 кГц і подає його на лавинно-пролітний діод або на відбивний клістрон. Унаслідок НВЧ-коливання також мають обвідну у вигляді прямокутного радіоімпульсу. Радіоімпульси через атенюатор  $A$ , вентиль  $ВН$  і секцію контролю потужності  $KП$  надходять до простого трійника  $T$ , який поділяє НВЧ-енергію на дві рівні частини, що напрямляються в однакові випромінювальні рупори  $PВ_1$  і  $PВ_2$ . Частина НВЧ-енергії відбивається від зовнішньої поверхні контрольованого об'єкта  $КО$  й еталону  $ЕТ$ , але загасає у вентилі й атенюаторі та майже не впливає на роботу генератора  $G$ . Якщо властивості об'єкта контролю й еталона однакові, то напруженість електричного поля в 1 і 2 каналах (об'єкта контролю й еталону) однакова. Тому після випрямлення діодами  $Д_1$  і  $Д_2$  НВЧ-сигнали напруги на резисторах  $R_1$  і  $R_2$  матимуть вигляд однакових прямокутних імпульсів. Отримати максимальний сигнал дозволяє налаштування за допомогою короткозамикальних настроювальних поршнів  $НП_1$  і  $НП_2$ . Ураховуючи різну полярність напруг  $u_a$  і  $u_b$ , неважко бачити, що потенціал середньої точки потенціометра при певному положенні його движка, який досягається при налаштуванні, дорівнюватиме нулю ( $u_c = 0$ ). Унаслідок цього напруги на виході підсилювача  $П$  і фазового детектора  $ФД$  також дорівнюватимуть нулю та не викличуть відхилення стрілкового приладу  $СП$ .

Припустимо, контрольований об'єкт має товщину меншу за номінальне значення. У цьому разі напруженість поля в приймальному рупорі  $PВ_2$  буде більшою, ніж при номінальному значенні товщини об'єкта, збільшиться імпульс напруги ( $u_b$ ) на виході детектора  $Д_2$ , що призведе до появи напруги ( $u_c$ ) на движку потенціометра  $R$  і відповідно на виході підсилювача  $П$  ( $u_d$ ) при збільшенні товщини. Внаслідок роботи фазового детектора  $ФД$  з урахуванням фази опорної напруги, створюваного модулятором  $М$  і

збіжного, наприклад, з напругою  $u_a$ , на його виході з'явиться постійна негативна вихідна напруга, яку покаже стрілковий прилад *СП*.

Таким чином, двоканальний пристрій, побудований відповідно до функціональної схеми, зображеної на рис. 2.9, має підвищену чутливість за рахунок порівняння сигналів еталонного та контрольованого об'єктів або за рахунок наявності посилення прирощення сигналів обвідної НВЧ-коливань зі змінного струму. Використання модуляції прямокутними імпульсами та застосування фазового детектора *ФД* є типовим і дає можливість підвищити чутливість і визначити знак прирощення контрольованого параметра.

Пристрій із двома каналами (див. рис. 2.9) дозволяє визначити зміни товщини, магнітної та діелектричної проникності, питомої електричної провідності, а також наявність неоднорідностей в об'єкті. Радіохвильовий контроль за допомогою цього пристрою може проводитися трьома різними способами: абсолютними вимірами параметрів контрольованого об'єкта, відносними вимірюваннями (контроль відхилення в полі допуску) шляхом порівняння з еталоном або зразковим об'єктом (цей режим описаний раніше) і шляхом самопорівняння двох різних ділянок контрольованого об'єкта, що характеризує високу універсальність цього пристрою, а також забезпечує високу стабільність нуля і можливість реалізації високої чутливості при рахунок посилення сигналів зі змінного струму. Однак такий пристрій не дає можливості вести радіохвильовий контроль із урахуванням фази НВЧ-сигналів, щопройді, це знижує його інформаційної здатності. Таку обробку можна проводити, якщо до випрямлення НВЧ-сигналів використовувати трійник, де відбуватиметься їх додавання з урахуванням фази.

Функціональна схема найпростішого варіанта пристрою для радіохвильового контролю прохідного випромінювання, з урахуванням амплітудних і фазових характеристик НВЧ-сигналів, що використовується у дефектоскопії, наведена на рис. 2.10 (основні позначення відповідають рис. 2.9). Цей пристрій містить два однакові прості  $T_1$  і  $T_2$  трійники, що

дозволяє розділити випромінену енергію на два потоки, а потім додати отримані НВЧ-сигнали.

Розглянуті пристрої дозволяють вирішити більшість практичних завдань, доступних для контролю прохідного випромінювання.

### 2.6.6 Параметричні методи контролю

Параметричні (резонансні) методи радіохвильового контролю зводяться до того, що контрольований об'єкт поміщається в резонатор, хвилевід або довгу лінію і за зміною параметрів цих елементів (резонансна частота, добротність, розподіл поля та ін.) визначають якість об'єкта. За допомогою параметричного методу можливий контроль геометричних характеристик різних об'єктів, електромагнітних властивостей матеріалів і наявності неоднорідностей у них. Параметричні методи дозволяють перевіряти речовини в будь-яких агрегатних станах (тверді, рідкі, газоподібні, плазма). Радіохвильовий контроль геометричних розмірів різних виробів із матеріалів із хорошою провідністю можливий лише щодо поверхонь, до яких можливий доступ, тобто зовнішніх і деяких внутрішніх. Приклади виконання об'єктів такого контролю ілюструються на рис. 2.11 та 2.12.

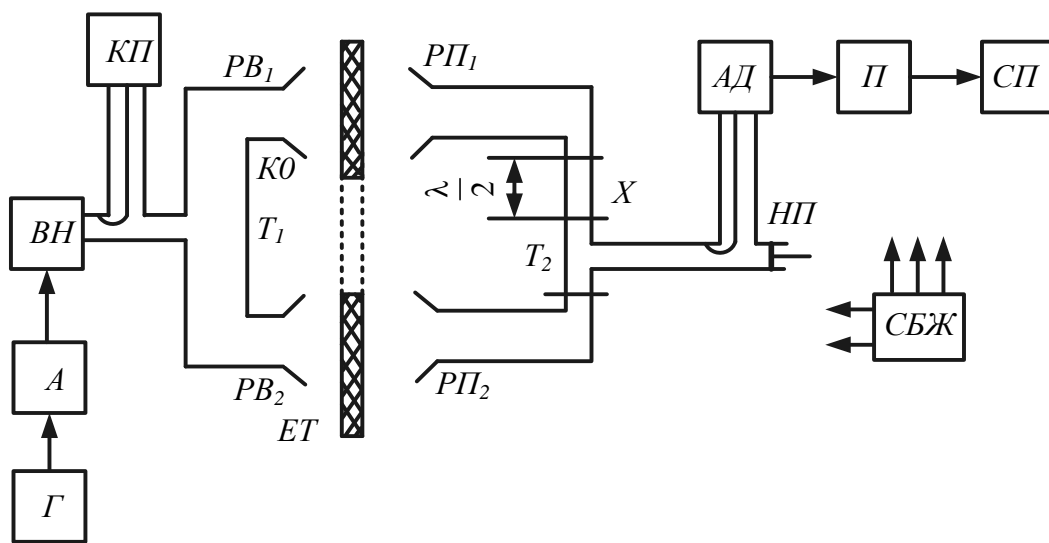


Рисунок 2.10 – Функціональна схема амплітудно-фазового НВЧ-приладу

Протяжний контрольований об'єкт  $KO$  (наприклад, труба або пруток) можна поміщати в порожнину об'ємного резонатора  $P$  або хвилевідний тракт  $X$ . Якщо об'єкт поміщений у порожнину резонатора  $P$  (рис. 2.11 а), то він змінює його робочий об'єм (резонансну частоту) або створює додаткові втрати енергії (зменшує добротність). Для металевих виробів основним є зміна частоти, що дає можливість проводити контроль зовнішнього діаметра труби  $D$ , прутка і т. п. У разі, коли труба виготовлена з діелектричного матеріалу, факторами, що впливають, є всі геометричні розміри труби (зовнішній  $D$  і внутрішній  $d$  діаметри, товщина) й електромагнітні параметри (діелектрична та магнітна проникності, питома електрична провідність). За схемою рис. 2.11 а можна організувати радіохвильовий контроль виробів у технологічному потоці.

При контролі виробів у вигляді коротких труб можна їх увімкнути безпосередньо в НВЧ-тракт (рис. 2.11 б). У такому варіанті труба може бути розглянута як відрізок хвилеводу або довгої лінії з певними параметрами, що приводять до зміни характеристик відбитої хвилі. Для кращого узгодження хвилевідного тракту з відрізком труби ділянки хвилеводів  $ПХ$  і  $ОХ$  виконані спеціальної форми, плавно сполучуваної з поперечним перерізом труби  $KO$ , а на їх краях для зниження затікання струмів на зовнішню поверхню хвилеводів  $ПХ$  і  $ОХ$  виконані короткозамкнені чвертьхвильові ділянки  $KП_1$  і  $KП_2$ . Певний режим роботи вимірювальної ділянки хвилеводу забезпечує відрізок хвилеводу  $ОХ$ , що навантажений на короткозамкнену секцію з настроюваним поршнем  $НП$  (рис. 2.11 б) або на узгоджене навантаження для отримання режиму біжучої хвилі. На рис. 2.11 в показаний об'єкт у вигляді діелектричного покриття на металевій основі. Однією зі стінок резонатора  $P$  у цьому разі служить металева основа, де використаний НВЧ-генератор із частотною модуляцією (хитна частота). Як первинний перетворювач у ньому застосований вимірювальний резонатор, резонансна частота якого залежить від товщини покриття та його діелектричних параметрів. За зсувом резонансної частоти знаходять контрольовану величину.

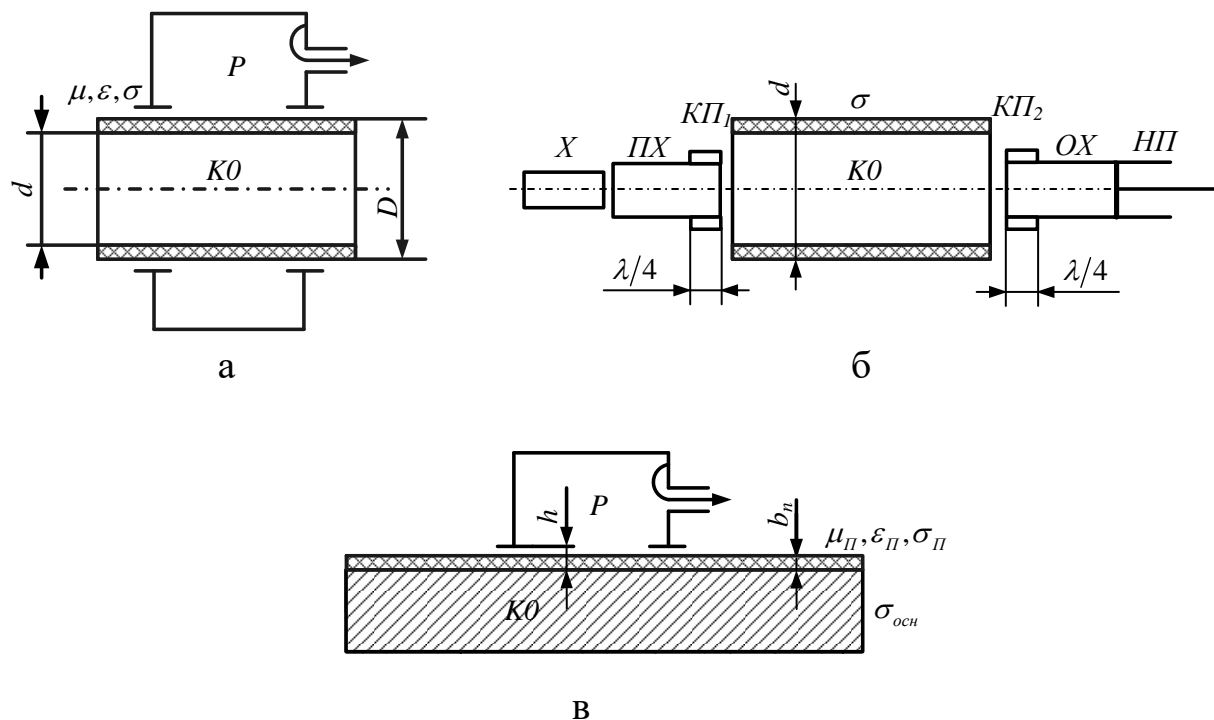
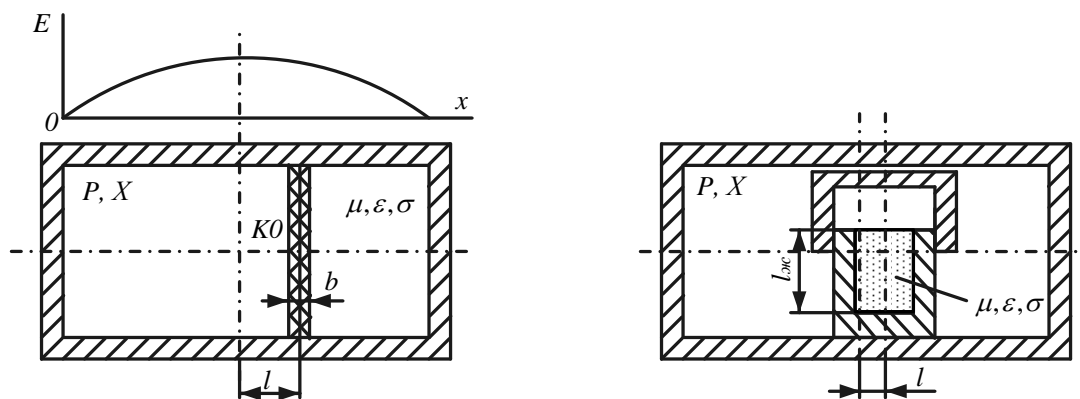


Рисунок 2.11 – Контроль геометричних розмірів і фізико-хімічних властивостей: а – об'ємним резонатором; б – хвилеводом; в – відкритим резонатором

Успішно використовуються параметричні радіохвильові методи при контролі рівня та кількості рідин або летких речовин. У цьому разі відрізок хвилеводу або довгої лінії зазвичай запаюють з одного кінця, з іншого підключають вимірювальну апаратуру, а рідину або газ вводять збоку через спеціально передбачений отвір, який не повинен істотно впливати на параметри НВЧ-тракту.

За допомогою резонатора  $P$  або відрізків хвилеводів  $X$  (рис. 2.12) можна проводити контроль електромагнітних властивостей різних речовин. При цьому тверді тіла безпосередньо поміщають в об'єм резонатора або хвилеводу (рис. 2.12 а), а рідкі, сипкі та газоподібні речовини попередньо завантажують у дозувальні ампули (рис. 2.12 б) або пропускають по спеціально передбачених трубках.



а

б

Рисунок 2.12 – Схема контролю фізико-хімічних властивостей: а – твердих тіл; б – рідин

Параметричні радіохвильові методи дають можливість виявляти лише досить грубі неоднорідності (дефекти), такі як, наприклад, металеві включення в діелектрику, і внаслідок цього мають обмежену область застосування, виняток становлять дефектоскопи, побудовані на принципах ядерних магнітних резонансів.

Контроль за одним параметром має досить обмежені можливості та часто не дозволяє отримати більшу точність і достовірність, у зв'язку з цим багатопараметричний контроль застосовується у двох випадках: потрібно виміряти один параметр незалежно від інших величин і необхідно визначати декілька параметрів у контрольованому об'єкті одночасно або поетапно.

### 2.6.7 Візуалізація радіохвильових полів

Візуалізація (одержання видимих зображень) розподілу фізичних величин, що характеризують електромагнітне НВЧ-поле (густини енергії, напруженості електричного або магнітного поля, їх компонент і т. д.), необхідна для вивчення внутрішньої будови складних виробів (інтроскопія, радіобачення) і для високої виробничої дефектоскопії об'єктів великих розмірів (порівняно з довжиною хвилі та розкриттям антен). Унаслідок візуалізації отримують видиме радіозображення, аналіз якого дає можливість

збільшити швидкість контролю, полегшує розшифрування результатів для виробів різної форми.

Радіозображення можна отримати шляхом розгортки (послідовний поелементний аналіз) або відразу в усіх точках двовимірної картини (аналіз у реальному масштабі часу).

Найбільш простим у конструктивному відношенні прикладом пристрою для візуалізації розподілу НВЧ- або теплових випромінювань є радіовізор, який дозволяє проводити спостереження полів у площині його екрана в реальному масштабі часу. Покладений у його основу принцип перетворення інтенсивності падаючого на екран випромінювання в теплову енергію, що підігріває люмінофор, забезпечує широкий спектральний діапазон його роботи.

Основний елемент радіовізора (рис. 2.13) – люмінесцентний екран *ЛШ* із нанесеним на нього із зовнішнього боку тонким шаром металу *ШМ*, який є неселективним перетворювачем НВЧ- й інфрачервоного випромінювання в тепловий рельєф. Екран *ЛШ* із внутрішнього боку рівномірно висвітлюється ультрафіолетовим світлом лампи *УЛ*, інтенсивність якого обирається залежно від середнього рівня падаючого випромінювання шляхом підбору потужності живлення *УЛ* регульовальними елементами *РЕ*. Випромінювання, що пройшло або відбивається від контрольованого об'єкта, падає на шар *ШМ*, значною мірою поглинається ним і створює на поверхні люмінесцентного шару *ЛШ* різну температуру залежно від енергії, що потрапляє на цю ділянку. Яскравість світіння люмінофора залежить від його температури і за яскравістю світіння екрана радіовізора роблять висновки про властивості контрольованого об'єкта *КО*, що опромінюється від джерела випромінювання *ДВ*.

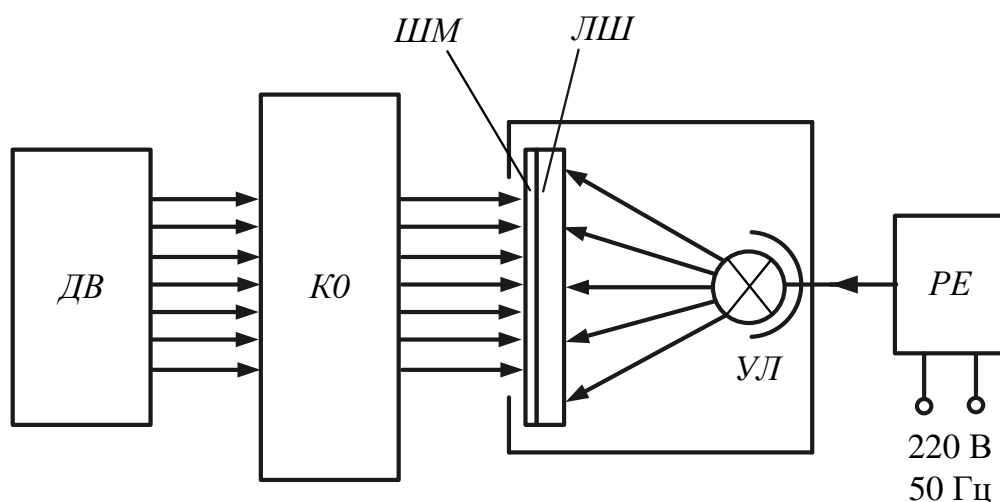


Рисунок 2.13 – Схема пристрою радіовізора

Радіовізор є широкосмуговим пристроєм, дає наочну картину розподілу густини енергії електромагнітного поля, простий у використанні й успішно застосовується для радіохвильового та теплового контролю. Незручністю під час роботи з ним є невисока чутливість, невеликі розміри зображення й те, що результати контролю залежать від досвіду оператора.

Отримання зображення в реальному масштабі часу можливе також за допомогою рідких кристалів і фотоемульсій (фотоплівок), що сприйнятливі до теплової дії НВЧ-випромінювання.

Засоби візуалізації НВЧ-полів можуть бути застосовані так само для отримання й аналізу інтерференційних картин і голографічних зображень [1, 5, 6].

## 2.7 Теми практичних (семінарських) занять і контрольні питання до розділу 2

### Теми практичних (семінарських) занять

1. Особливості електромагнітних процесів у НВЧ-діапазоні (п. 2.3).
2. Загальні питання побудови апаратури радіохвильового контролю (п. 2.4).



3. Особливості взаємодії радіохвильового випромінювання з об'єктами контролю (п. 2.5).
4. Основні типи джерел надвисокочастотних коливань (п. 2.6.1).
5. Основні пристрої для формування та обробки НВЧ-сигналів і полів (п. 2.6.2).
6. Індикатори та перетворювачі радіохвильового випромінювання (п. 2.6.3).
7. Одноканальні методи радіохвильового контролю (п. 2.6.4).
8. Двоканальні методи радіохвильового контролю (п. 2.6.5).
9. Параметричні методи контролю (п. 2.6.6).
10. Основні принципи візуалізації радіохвильових полів. Схема пристрою радіовізора (п. 2.6.7).

### **Контрольні питання**

1. На яких фізичних принципах базується радіохвильовий контроль матеріалів і середовищ? Техніка безпеки при радіохвильовому контролі.
2. У чому полягають особливості електромагнітних процесів у НВЧ-діапазоні? Основні параметри, що характеризують електромагнітні процеси.
3. У чому відмінність одноканальних і багатоканальних схем радіохвильового контролю?
4. Чим відрізняється коефіцієнт відбиття від коефіцієнта заломлення на межі розділу двох середовищ?
5. У чому полягає явище повного відбиття на межі розділу двох середовищ?
6. У чому полягає принцип роботи генератора на ЛПД? Функціональна схема генератора.
7. У чому полягає принцип роботи НВЧ-генератора на відбивному клістріоні? Функціональна схема генератора.
8. Які основні типи випромінювальних і приймальних пристроїв НВЧ вам відомі?

9. У чому полягає призначення каналізуючих пристроїв НВЧ? Навести приклади основних пристроїв.
10. Які основні елементи використовуються під час реалізації схем радіохвильового контролю? Назвіть їх і дайте коротку характеристику.
11. У чому полягає геометричний (променевий) метод радіохвильового контролю?
12. Які основні положення побудови одноканальної схеми радіохвильового контролю прохідного випромінювання?
13. Чим відрізняється схема двоканального пристрою радіохвильового контролю від одноканального?
14. Які основні принципи побудови схеми амплітудно-фазового НВЧ-приладу? Подати його функціональну схему.
15. У чому полягає параметричний метод радіохвильового контролю? Подати схеми контролю.
16. Якими способами може бути реалізований багатопараметричний контроль?
17. У чому полягають фізичні принципи візуалізації радіохвильових полів? Схема пристрою радіовізора.

### 3. ОПТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ

#### 3.1 Загальні питання оптичного контролю

Оптичні методи діагностики матеріалів базуються на взаємодії світлового випромінювання з контрольованим об'єктом і реєстрації результатів цієї взаємодії [1–8]. Методи, характерні для оптичного контролю, використовують електромагнітне випромінювання діапазону довжин хвиль у вакуумі від  $10^{-5}$  до  $10^3$  мкм ( $3 \cdot 10^{18}$  –  $3 \cdot 10^{10}$  Гц) й охоплюють ультрафіолетове (УФ), видиме (ВВ) й інфрачервоне (ІЧ) випромінювання. При цьому поєднуються вони між собою спільністю застосовуваних методик, способів і прийомів проведення контролю. У більшості варіантів контролю довжина хвилі світла мала порівняно з геометричними розмірами деталей, елементів і дефектів контрольованих об'єктів, що дозволяє використовувати при аналізі взаємодії випромінювання з об'єктом методи геометричної оптики. Разом із тим у ряді випадків (виявлення дефектів малих розмірів, контроль тонких плівок, випробування голографічними й інтерференційними методами та ін.) застосовуються методи, характерні для аналізу хвильових процесів [9]. У цій частині методи оптичного контролю близькі до методів радіохвильового контролю, аналогічні й величини, що несуть корисну інформацію.

Оптичні методи контролю якості можна умовно розділити на три групи:

1. Візуальний і візуально-оптичний методи характеризуються тим, що результати контролю найбільшою мірою визначаються особистими якостями оператора: його зором, умінням та досвідом. Візуальні методи контролю якості найбільш доступні та прості, тому мають велике поширення.

2. Фотометричний, денситометричний, спектральний і телевізійний методи здебільшого будуються на результатах апаратурних вимірювань і забезпечують меншу суб'єктивність контролю, їх застосування за складом контрольно-вимірювальних операцій ближче до роботи з електронно-вимірювальними приладами.

3. Інтерференційний, дифракційний, фазовоконтрастний, рефрактометричний, нефелометричний, поляризаційний, стробоскопічний і голографічний методи використовують хвильові властивості світла та дозволяють виробляти неруйнівний контроль об'єктів із чутливістю до десятих часток довжини хвилі джерела випромінювання.

За допомогою оптичних методів можна контролювати об'єкти з матеріалів, прозорих і напівпрозорих для світлового випромінювання. Якщо ж матеріал об'єкта непрозорий, у такого об'єкта можна перевіряти стан зовнішніх і внутрішніх поверхонь або розмірів. Залежно від властивостей матеріалу контрольованого об'єкта оптичний контроль здійснюється у відбитому, прохідному або розсіяному випромінюванні, а в необхідних випадках і при комбінованому освітленні. Параметри джерел світла (інтенсивність, спектр, напрямок, поляризація і т. д.) обирають, виходячи з конкретних умов, щоб забезпечити максимальний контраст зображення. У всіх випадках бажано мати в приміщенні загальне освітлення, що створює освітленість не менше 10 % від використовуваного місцевого освітлення. При цьому використовують поняття контрасту зображення дефекту: нормований перепад яскравості на дефектній ділянці та фоні навколо дефекту, тобто відбитого або світла, що пройшло крізь матеріал контрольованого об'єкта:

$$K_d = (B_\phi - B_d) / B_\phi, \quad (3.1)$$

де  $B_d, B_\phi$  – яскравість зображення дефекту і фону, кд/м<sup>2</sup>.

### **3.1.1 Загальні правила з техніки безпеки та охорони праці**

Оптичний контроль відбувається при підвищеному навантаженні на очі оператора, що необхідно враховувати під час його організації. Особливу небезпеку можуть становити джерела, що несуть концентровані потоки світлової енергії, насамперед чергу оптичні квантові генератори – лазери [21–22]. Тому робота з лазерними установками, особливо при значних

потужностях, повинна здійснюватись у спеціальних приміщеннях із використанням захисних окулярів зі світлофільтрами, що затримують велику частину випромінювання, і під час екранування найбільш небезпечної частини установки. Потрібно пам'ятати, що найбільш небезпечне опромінення очей, вони уражаються випромінюванням квантового генератора настільки швидко, що при опроміненні важко вжити захисні заходи, які у разі небезпеки необхідно передбачити заздалегідь. Максимально допустимі рівні густини потоку потужності залежно від типу лазера, довжини хвилі та режиму роботи оператора становлять для шкіри  $0,1 \text{ Дж/см}^2$ , а для очей –  $0,002\text{--}1,0 \text{ мкДж/см}^2$ .

Як індивідуальні засоби захисту персоналу, який працює з квантовими генераторами, можуть бути застосовані: захисні окуляри, спеціальний одяг і рукавички, а також креми (із двоокисом титану та цинку) для додаткового захисту шкіри обличчя та рук. Підвищену увагу при великих потужностях лазерного випромінювання, хоча б й імпульсних, потрібно приділяти протипожежній безпеці.

### 3.2 Джерела світла

У неруйнівному контролі якості під джерелом світла розуміють випромінювач електромагнітних коливань в оптичній частині спектра: інфрачервоній, видимій та ультрафіолетовій. Для отримання світлових потоків використовують електричні лампи розжарювання, газорозрядні і люмінесцентні, світлодіоди та оптичні квантові генератори [22–26]. В оптичному контролі якості найбільшого поширення на сьогодні отримали лампи розжарювання в спеціальному виконанні та оптичні квантові генератори.

1. *Лампи розжарювання* випускають світло за рахунок нагрівання електричним струмом провідника у вигляді спіралі з тугоплавкого матеріалу, що змонтована в колбі, заповненій інертним газом (криптон, ксенон) або вакуумованій (до  $10^{-4}\text{--}10^{-5}$  мм рт. ст.). Лампи розжарювання відрізняються

різноманітністю конструкцій та областей застосування, електричними параметрами та потужністю, спектральним складом, зручністю у використанні та простотою обслуговування, що визначає велике поширення їх серед джерел світла. Недоліком ламп розжарювання є порівняно невеликий термін служби, що обмежується випаровуванням металу нитки розжарювання, а також малим ККД.

Галогенні лампи володіють великою світловою віддачею у видимому діапазоні світла, мають великий термін служби і застосовуються для створення великих світлових потоків у проєкційних апаратах, мікроскопах та ін. Такі лампи для оптичних приладів виготовляють зазвичай на невеликі напруги джерела електроживлення (6–24 В), щоб використовувати нитку розжарювання невеликих розмірів і поліпшити однорідність створюваного світлового потоку.

2. *Газорозрядні лампи* використовують світловий ефект, що з'являється під час виникнення електричного розряду в газах або парах. У газорозрядних лампах різної конструкції та потужності використовують різний тиск газу або пари в колбі та різні види розряду: дуговий, тліючий або імпульсний. Ці лампи мають високу світлову віддачу і великий термін служби.

Найбільше поширення для організації загального освітлення виробничих приміщень і лабораторій отримали люмінесцентні лампи. Це газорозрядні лампи низького тиску, в яких ультрафіолетове випромінювання парів ртуті перетворюється люмінофором, нанесеним на внутрішню поверхню циліндричної колби, випромінювання видимого світла, близького до природного денного світла. Спектр випромінювання газорозрядних ламп близький до лінійчатого.

3. *Світловипромінювальні діоди* є малогабаритними напівпровідниковими джерелами інфрачервоного або видимого світла, зазвичай близького до монохроматичного (червоний, зелений, блакитний та ін.) Вони побудовані на основі напівпровідникових матеріалів, леговані малими кількостями домішок, спеціально підбираються для отримання світла

необхідної довжини хвилі. Світловипромінювальні діоди мають такі самі переваги, як й елементи напівпровідникової техніки. Вони створюють потоки невеликої величини і тому використовуються лише в деяких малогабаритних пристроях.

4. *Оптичні квантові генератори* (лазери) [22] – це джерела світла, що працюють на базі процесу вимушеного (стимульованого, індукованого) випускання фотонів збудженими атомами або молекулами під впливом фотонів випромінювання, що мають ту саму частоту. Оптичні квантові генератори створюються на базі різних активних середовищ: газоподібному, рідкому або твердому. Вони можуть давати випромінювання в досить широкому діапазоні довжин хвиль – від 100 нм (ультрафіолетове світло) до 1,2 мкм (інфрачервоне випромінювання) – і можуть працювати як у безперервному, так і в імпульсному режимі.

Лазер складається із трьох принципово важливих вузлів: випромінювача, системи накачування та джерела живлення, робота яких забезпечується за допомогою спеціальних допоміжних пристроїв.

В оптичному контролі якості лазери можуть застосовуватися як джерела вузького монохроматичного пучка світла під час вирішення контрольно-вимірювальних завдань, для чого потрібна підвищена точність, але головні галузі їх застосування, де вони незамінні, пов'язані з використанням хвильових властивостей світла – інтерференції, дифракції й т. д.

### **3.3 Основні оптичні елементи та пристрої**

У практиці оптичного контролю якості застосовують різні елементи та пристрої, що утворюють найбільш важливий вузол оптико-електронних приладів і блоків устаткування –*оптичну систему* [22-25]. Головним призначенням оптичної системи є отримання достатнього потоку світлової енергії корисних сигналів або чіткого зображення досліджуваного об'єкта. Одним із центральних понять для оптичної системи є поняття «*оптична вісь*»

– лінія, на якій розміщуються центри заломлювальних або відбивних поверхонь елементів системи. Якщо центри всіх елементів системи знаходяться на оптичній осі, вона називається головною. Деталі зображення, розміщені близько до оптичної осі, виходять найбільш чіткими.

Оптична система може складатися з різних елементів: лінз, дзеркал, призм, фільтрів тощо за різних поєднань і залежно від конкретного її призначення. Вона характеризується фокусною відстанню, роздільною здатністю, світлосилою, кутом поля зображення (зору) та ін.

*Фокусною відстанню* системи (переднім або заднім) називають відстань від фокуса до головної точки, тобто точки, де в площині, перпендикулярній до головної оптичної осі, зображення збігається з його натуральною величиною. Якщо середовища об'єктів і зображень мають однакові оптичні властивості, то передня та задня фокусні відстані однакові. Фокуси системи відповідають зображенню нескінченно віддаленої точки.

*Роздільною здатністю* оптичної системи називають мінімальну відстань між простими розрізняваними елементами об'єкта, близько розташованими в просторі. В оптиці роздільна здатність зазвичай вимірюється числом ліній, помітних на довжині 1 мм.

1. *Лінзою* називають деталь, виготовлену із полірованого прозорого для випромінювання, що пропускається, матеріалу, обмеженого криволінійними полірованими поверхнями. Залежно від форми та положення фокуса лінзи бувають збиральні, розсіювальні та спеціальні. Фокусна відстань лінзи визначається її геометрією та матеріалом. При побудові зображення, створюваного лінзою (простого однолінзового об'єктива), використовують властивості проходження світлових променів крізь лінзу: промені, що йдуть паралельно головній оптичній осі, після лінзи проходять через точку фокуса, а промені, що проходять через центр лінзи і не заломлюються, якщо лінза тонка.

В об'єктиві, що складається із декількох лінз, отримання зображення і розрахунки його характерних точок робляться послідовно.



Зображення, що отримують на виході оптичної системи, щодо зображення об'єкта має різні спотворення, які називаються *абераціями*. Аберации можуть бути геометричними і хроматичними, зумовленими неоднаковим проходженням світла різних довжин хвиль.

*Геометричні аберации* виникають через використання широких або похило падаючих пучків світла (сферична аберация, кома, астигматизм, дисторсія) і призводять до розмиття та спотворення форми зображення об'єкта, зміни відстаней і кутів між елементами зображення.

*Сферична аберация* полягає в отриманні замість точки зображення у вигляді кільця розсіяння, кома – у вигляді витягнутої та нерівномірно освітленої плями, що нагадує комету.

*Астигматизм* призводить до отримання еліптичного зображення замість кільця, а дисторсія – до викривлення прямих ліній, унаслідок чого квадрат має подушкоподібну або бочкоподібну форму.

*Хроматичні аберации* проявляються під час зміни довжини хвилі монохроматичного світла або при використанні світла складного спектрального складу, наприклад білого. Причина хроматичних абераций – дисперсія світла, тобто залежність оптичних властивостей матеріалу (показника заломлення речовини, загасання й ін.) елементів оптичної системи від довжини хвилі світла. Внаслідок хроматичних абераций зображення розмивається й у площині зображень утворюються райдужні смужки.

Для зменшення абераций обмежують поле зору діафрагмами, застосовують лінзи з тонких і якісних матеріалів, а об'єктиви роблять із багатьох елементів (лінз, дзеркал та ін.), що підбираються так, щоб внесені ними спотворення взаємно компенсувалися.

2. *Дзеркалом* називають оптичний елемент із полірованою поверхнею, що утворює необхідні світлові потоки або зображення шляхом відбиття падаючих на нього променів. Дзеркала виготовляють із металів (срібло, алюміній, золото, хром, нікель та ін.) або шляхом напилювання плівок із цих

металів на тверді матеріали (скло, кераміку, сталь і т. д.). Дзеркала можуть виконувати ті самі функції, що й лінзи, зокрема на їх основі можуть створюватися дзеркальні об'єктиви, а в поєднанні з лінзами отримують дзеркально-лінзові об'єктиви. У деяких випадках використовують напівпрозорі дзеркала, що частково відбивають і пропускають світлове випромінювання.

3. *Призмой* називають оптичний елемент, виконаний з однорідного матеріалу у вигляді фігури, обмеженої кількома пересічними площинами, що має зокрема дві паралельні грані (основи), які рівними багатокутниками, а інші грані (бічні) – паралелограмами. Призми використовуються для зміни напрямку ходу променів і можуть створювати хроматичні аберації.

4. *Фільтри* (світлофільтри) – пристрої, призначені для пропускання світла необхідного електромагнітного спектра та затримки заважаючого світлового випромінювання. Особливістю фільтрів у оптичному діапазоні є зменшення розмірів деталей і елементів, що визначають спектральні властивості, відповідно до довжини хвилі.

5. *Діафрагми, маски та шаблони* застосовують для обмеження прохідного світлового потоку або його спектрального складу в площині, перпендикулярній до головної оптичної осі. Ці пристрої часто виконуються у вигляді пластини з отворами.

6. *Волоконно-оптичні світловоди*. Волоконний світловід є фактично діелектричним хвилеводом, виконаним з двох оптично прозорих шарів круглого поперечного перерізу – сердечника та оболонки. Елементарним світловодом є тонка нитка діаметром 10–20 мкм, причому зовнішній шар має товщину 1–3 мкм і виготовлений зі скла з меншим показником заломлення, ніж сердечник. Тому промені світла, потрапляючи в центральну частину світловода, відчувають повне внутрішнє відбиття від межі сердечника чи оболонки та передаються вздовж світловода.

Для передачі світлових потоків чи зображень окремі світлопровідні волокна об'єднують у джгути. Великою перевагою волоконно-оптичних

джгутів є передача зображення при їх вигині за будь-яким профілем на відстань до декількох метрів і різноманітні можливості з кодування світлової інформації. Якщо виконати вхідний і вихідний торці волоконно-оптичного джгута різної конфігурації або по-різному розташувати в них волокна, то можна виробляти перетворення зображень (розтягувати, стискати, повертати, розщеплювати та виробляти будь-які інші перетворення форми). Ця особливість відкриває великі можливості з обробки оптичної інформації, підвищення точності та достовірності контролю.

### **3.4 Первинні перетворювачі оптичного випромінювання**

Випромінювання оптичного діапазону можуть перетворюватися у видиме зображення (інфрачервоне й ультрафіолетове) або в електричний сигнал.

Первинні вимірювальні перетворювачі світлового випромінювання в електричний сигнал є основою автоматизованих пристроїв неруйнівного оптичного контролю. Як первинні вимірювальні перетворювачі використовують: фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори, вакуумні фотоелементи й фотоелектронні помножувачі, матриці на базі напівпровідникових матеріалів і передавальні телевізійні трубки [23,24].

1. *Фоторезистори та вакуумні фотоелементи* мають найкращі метрологічні характеристики під час перетворення інтенсивності світла в електричний сигнал. Фоторезистори можуть забезпечити реєстрацію невеликих світлових потоків у широкому спектральному діапазоні довжин хвиль падаючих фотонів, особливо під час охолодження їх до криогенних температур (охолоджувані болометри). Їх недоліком є нелінійність світлової характеристики та виявлювана іноді інерційність. Вакуумні фотоелементи мають лінійну світлову характеристику, але оскільки в них використовується зовнішній фотоефект, їх чутливість невелика, а спектральний діапазон роботи менший, що проявляється особливо сильно поблизу «червоної межі»

для квантів із малою енергією. Ці властивості обумовлюють застосування вакуумних фотоелементів для точних світлотехнічних вимірювань.

2. *Фотодіоди та фототранзистори* мають високу чутливість, але недостатньо стабільні характеристики (сильна залежність від температури). Тому вони застосовуються в тих випадках, коли сигнал носить імпульсний характер і невеликі зміни їх параметрів не роблять істотного впливу на результати контролю.

3. *Фотоелектронні помножувачі* мають характеристики, подібні фотоелементам, але володіють порівняно з ними високою (в  $10\text{--}10^4$  рази) чутливістю до освітленості. Значно більші шуми і необхідність високовольтного живлення обмежують сферу їх застосування.

4. *Електронно-променеві передавальні трубки* перетворюють сформоване на їх мішені зображення в упорядковану послідовність електричних сигналів, що дає можливість отримувати та обробляти великий обсяг інформації про контрольований об'єкт. Для роботи електронно-променевих передавальних трубок необхідні високовольтний блок живлення електродів трубки, генератори рядкової та кадрової розгортки, попередній та кінцевий підсилювачі відеосигналу. Тому конструкція передавальної камери з електронно-променевою трубкою є складною та вимагає якісного налаштування. Матеріал мішені трубки значною мірою визначає її параметри та назву. Випускалися різні види передавальних електронно-променевих трубок: відікон, кадмікон, кремнікон, плюмбікон та інші. Нині електронно-променеві трубки замінюються напівпровідниковими ПЗЗ- та КМОН-сенсорами [24].

5. *ПЗЗ- та КМОН-сенсори* були створені завдяки досягненням мікроелектронної технології. Хоча технологія КМОН з'явилася першою, проте технологія ПЗЗ невдовзі почала витісняти її. Як тільки були вирішені перші проблеми технології виготовлення, ПЗЗ-матриці забезпечили більш високу якість зображення і стали основною технологією для цифрових відеокамер. Фірма Sony з самого початку стала

лідером в розробці ПЗЗ-матриць, нею була створена величезна науково-дослідницька база, яка дозволяє сьогодні успішно продовжувати вдосконалення технології виготовлення матриць.

У ПЗЗ- і КМОН-матрицях для перетворення світла в електричний сигнал використовуються фотодіоди. Однак їх принцип роботи різний. У приладах із зарядним зв'язком світло, що падає на поверхню матриці, реєструється фотодіодом кожного пікселя і перетворюється в електричний заряд (зарядовий пакет). Заряд з кожного пікселя переміщається у вертикальну транспортну шину, розташовану збоку від пікселя. Потім та допомогою спеціальних електродів зарядові пакети переміщуються по вертикальних і горизонтальних транспортних шинах, поки вони не досягнуть підсилювача, в якому і відбувається їх перетворення в електричний сигнал (рис. 3.1).

У такій конструкції існує проблема, яка виникає під час освітлення ділянок ПЗЗ-матриці яскравим світлом. На зображенні це проявляється у вигляді яскравої вертикальної смуги, що продовжується від яскравої ділянки. Крім того, потужність, яку споживає ПЗЗ-матриця достатньо велика для формату високої чіткості (наприклад, 1080p), коли потрібне швидке зчитування великої кількості пікселів. Також, на ранньому етапі істотним недоліком ПЗЗ-матриць були значні рівні фіксованого структурного шуму (Fixed Pattern Noise – FPN).

Розробка Sony технології *HAD* дозволила усунути цю проблему, що прискорило витіснення традиційних вакуумних передавальних трубок ПЗЗ-матрицями. Незабаром пішли інші технологічні прориви Sony, включаючи розробку і впровадження технології з рядково-кадровим перенесенням зарядів, а також впровадження лінзової структури пікселів для підвищення чутливості матриці. З появою ПЗЗ-матриць високої чіткості відразу постали проблеми швидкодії. Оскільки число елементів зображення на той момент вже досягло двох мільйонів, то це призвело до збільшення обсягу даних, що в свою чергу збільшило потужність, яку

споживає ПЗЗ-матриця. Для запобігання перегріву ПЗЗ-матриць використовують тепловідводи та охолоджуючі вентилятори. В таблиці 3.1 приведені основні параметри комерційно доступних ПЗЗ-матриць.

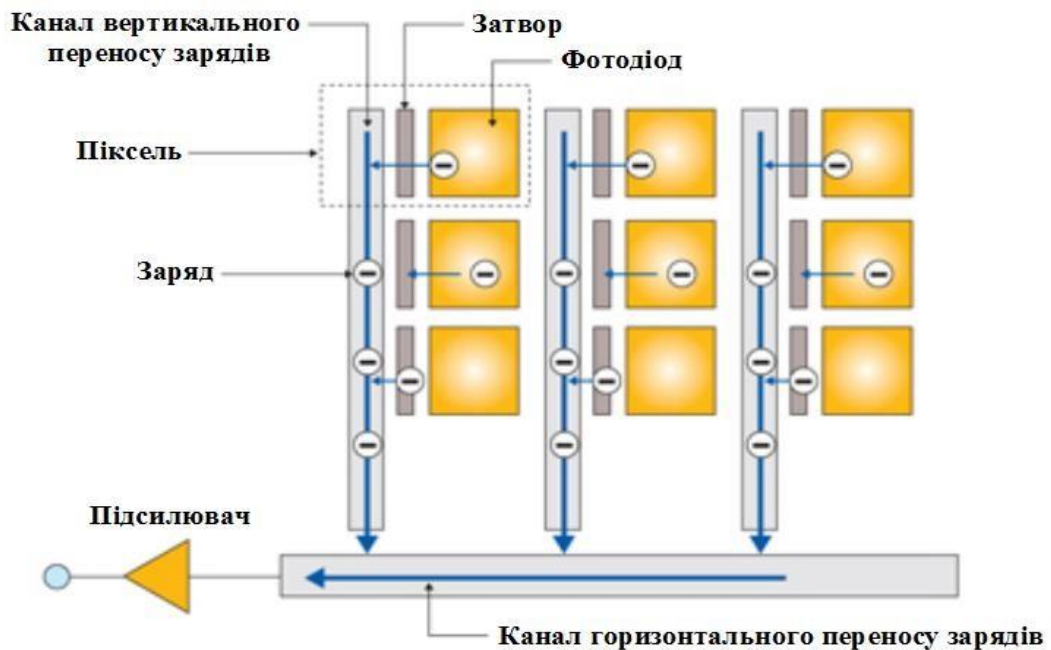


Рис. 3.1. Структура ПЗЗ-матриці

До переваг ПЗЗ-матриць перед КМОН можна віднести більш досконалий електронний затвор, який важливий для формування зображення рухомих об'єктів. Вони також мають низький рівень шуму та високу чутливість при низькій освітленості.

У КМОН-датчиках підсилювачі, що знаходяться у кожному пікселі, одразу перетворюють заряд пікселя в електричний сигнал, який потім передається на вихід (рис. 3.2). Замість затворів (як у ПЗЗ) у КМОН-матрицях використовуються перемикачі та внутрішні ланцюги, які керують послідовністю вихідних сигналів. Використання внутрішніх перемикачів дозволяє істотно знизити потужність, яка споживається при одночасному зчитуванні великої кількості пікселів. Ефективність зчитування виявляється цілком достатньою для підтримки прогресивного розкладання HD зображень.

Таблиця 3.1. Параметри деяких ПЗЗ-матриць, що випускаються

Найменування матриці	Кількість пікселів	Розмір діагоналі, мм	Ефективні пікселі (Г×В)	Частота кадрів, Гц	Розмір пікселя, мкм
<b>Sony</b>					
ICX419ALL	440K	8	752×582	30	8,4×8,4
ICX229AK	440K	4	752×582	50	4,2×4,2
ICX238AKE	380K	3	768×494	50	3,1×3,1
ICX205AK	1,4M	8	1392×1040	15	4×4
ICX252AK	3,2M	8	2078×1558	15	3×3
<b>Texas Instrument</b>					
TC253SPD-30	325K	6,08	656×496	60	7,4×7,4
TC285SPD-30	1M	11,2	1004×1002	20	8×8
<b>Dalsa</b>					
FTT1010M	1M	16,8	1024×1024	60	12×12
FTF2020M	4M	34,44	2048×2048	30	12×12
FTF3020C	6M	44,4	3072×3072	20	12×12
FTF4027M	11M	43,3	4008×2672	7,5	9×9
FTF4052M	22M	60,1	4008×5344	3,6	9×9
FTF5056C	33M	59,9	4992×6668	2	7,2×7,2
<b>Kodak</b>					
KAI-0340	VGA	5,9	640×480	110/210	9×9
KAI-1011	1M	12,9	1008×1018	15/30	9×9
KAI-2020	1,9M	14,8	1600×1200	15/30	7,4×7,4
KAI-4021	4,2M	21,4	2048×2048	8/15	7,4×7,4
KAI-16000	16M	43,4	4872×3248	1/3	7,4×7,4
KAF-1602	1,6M	16,6	1536×1024	2,2	9×9
KAF-16802	16,6M	51,9	4080×4080	0,5	9×9
KAF-39000	39M	61,3	7216×5412	0,9	6,8×6,8
<b>ЦНДІ "Електрон"</b>					
ФППЗ 32М	0,45M	20,7x15,7	768×580	33	27×27
ISD-075AP	1,6M	17,12x18,2	1225×1300	3	14×14
ФППЗ 12М1	1,2M	13,3x15	1024×1152	16	13×13

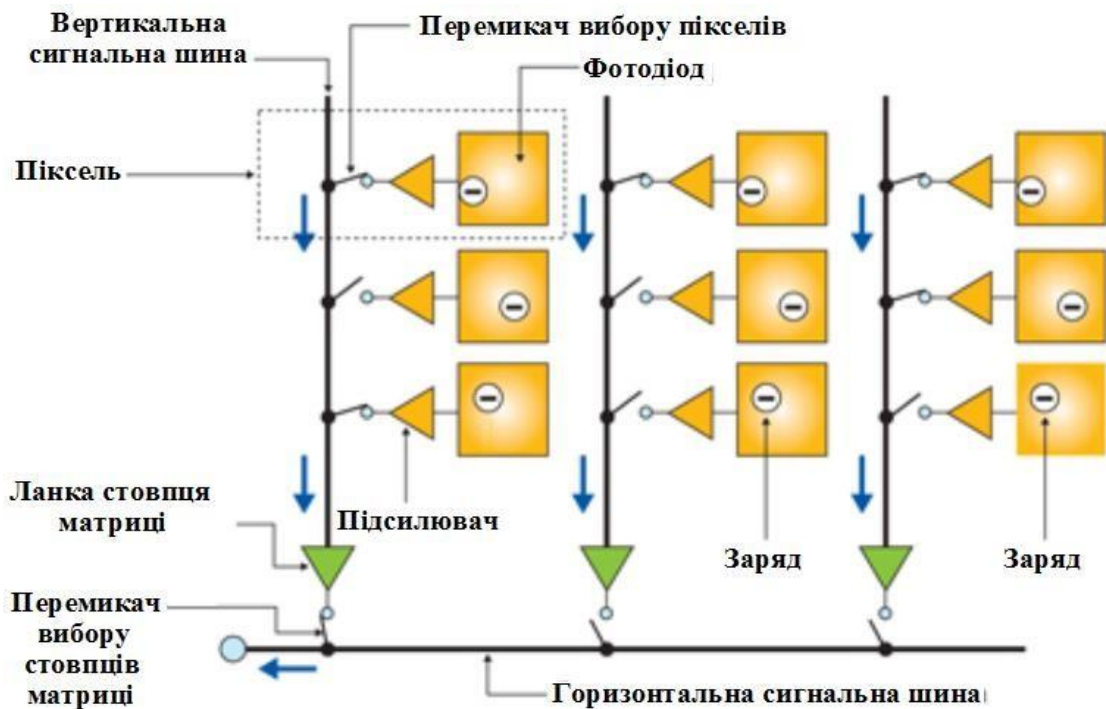


Рис. 3.2. Структура КМОН-матриці

КМОН-матриці дешевші за ПЗЗ, мають більшу швидкодію та споживають меншу потужність. Але у КМОН є і недоліки. Малий розмір світлочутливого елемента в порівнянні з площею пікселя негативно позначається на чутливості і призводить до необхідності попереднього підсилення сигналу. Це в свою чергу збільшує шуми на зображенні. Також суттєвим недоліком КМОН-технології є ефект *"біжучого затвора"*. Цей ефект пов'язаний з порядковим зчитуванням сигналу в КМОН-матриці. Ефект *"біжучого затвора"* спостерігається при формуванні зображення об'єктів, що швидко рухаються, проявляється у вигляді викривлення вертикальних елементів на зображенні.

### 3.5 Основні методи оптичного контролю

#### 3.5.1 Візуально-оптичні методи контролю

Мінімальний розмір дефекту, який чітко виявляється при візуальному контролі, залежить від характеру досліджуваного об'єкта (зокрема, чим грубіші його поверхня та структура, тим більший розмір виявленого дефекту), рівня яскравості та напрямку освітлення, контрасту між дефектом і



фоном, тобто від перепаду яскравостей, кольорів або відбивних здатностей, а також від особистих якостей оператора (зору, досвіду і т. д.). Орієнтовно вважають, що при візуальному контролі оператор із нормальним зором на відстані найкращого зору впевнено виявляє дефекти з мінімальним розміром 0,1 мм у площині, перпендикулярній до лінії спостереження.

Візуально-оптичним називають неруйнівний контроль якості із застосуванням оптичних засобів, що дозволяють істотно розширити межі природних можливостей органів зору людини. Він є технічним продовженням візуального контролю, дає можливість виявляти більш дрібні дефекти та проводити вимірювання з високою роздільною здатністю (1–5 мкм). Звичайно проводять багатоступінчастий контроль: оглядають поверхню виробу без оптичних засобів, виявляючи великі дефекти та підозрілі місця, вивчають ці місця через лупу (однолінзовий мікроскоп), а потім досліджують окремі ділянки контрольованого виробу за допомогою багатолінзового мікроскопа, послідовно підвищуючи кратність його збільшення. При правильному виборі умов візуально-оптичного контролю розміри елементів об'єкта або мінімальних дефектів  $l_{\min}$  (у мм), які можна виявити, зменшуються відповідно з оптичним збільшенням пристрою:

$$K_{\text{yg}}/l_{\min} = 0,1/K_{\text{yg}}. \quad (3.2)$$

Лупи призначені для оптичного контролю близько розташованих елементів зображення при невеликому збільшенні ( $2 - 20^{\times}$ ) і, як правило, при ручному контролі. Зручність роботи з ними визначається тим, що їх легко переміщати по контрольованому об'єкту, а зона огляду лупи порівняно велика.

Оскільки для луп і мікроскопів із великим збільшенням глибина різкості зменшується, проведення контролю за їх допомогою ускладнюється та вимагає більшого часу для фокусування зображення (пошуку відстані найкращого бачення).

Лупи мають різне конструктивне оформлення відповідно до варіантів їх застосування: оглядові – для контролю одночасно двома очима; налобні у

вигляді збільшувальних окулярів; складні, зокрема— кишенькові, вартові, телескопічні. Оптична частина лупи може складатися з однієї лінзи або декількох скріплених між собою, що дає можливість скорегувати частину аберацій і отримати зображення хорошої якості. Лупи з малим збільшенням ( $2-7^{\times}$ ) використовують для пошуку дефектів і дефектних зон, а з великим ( $5-20^{\times}$ ) – для їх аналізу та виявлення дефектів мінімально можливих розмірів. Щоб максимально використовувати можливості лупи під час проведення візуально-оптичного контролю, її (крім великих біноклярних луп) потрібно тримати якомога ближче до ока, оскільки в цьому разі сприймається найбільша кількість променів, що йдуть від контрольованого об'єкта, і знижується вплив відбиттів (відблисків) від сторонніх предметів і лінзи. Лупа розміщується, як правило, паралельно контрольованій поверхні, що підвищує продуктивність і достовірність візуально-оптичного контролю.

Мікроскоп є оптичним багатолінзовим пристроєм для спостереження елементів, не видимих неозброєним оком, що має регулювання оптичних властивостей. Він дає можливість отримати якісне збільшене зображення, причому збільшення може досягати 2000 разів, а лінійна просторова здатність – 0,5 мкм. Мікроскопи дозволяють проводити візуально-оптичний контроль при різних режимах освітлення та збільшення, а також за різними методиками. Лінзові системи є апланатичними, тобто для них виконується умова синусів

$$n_{ko} \sin \psi_{ko} = K_y n_{zo} \sin \psi_{zo}, \quad (3.3),$$

де  $n_{ko}$  і  $n_{zo}$  – показники заломлення середовища в просторі предметів і в просторі зображень;  $\psi_{ko}$  і  $\psi_{zo}$  – апертурні кути в просторі предметів і зображень.

За допомогою мікроскопів і пристроїв, побудованих за тим самим принципом, вирішуються такі завдання неруйнівного контролю якості: вимірювання геометричних розмірів і форми малогабаритних виробів, виявлення дефектів малих розмірів (до часток мікрметра) із високою роздільною здатністю за їх просторовим розташуванням, контроль фізико-

хімічних властивостей і стану матеріалів (внутрішніх положень) за їх оптичними характеристиками, контроль внутрішньої будови малогабаритних виробів або їх частин, розміщених у прозорому або напівпрозорому матеріалі.

Ендоскопом називають пристрій, забезпечений освітлювачем і оптичною системою для огляду внутрішньої поверхні об'єктів із порожнинами. Ендоскопи дозволяють здебільшого вирішувати завдання дефектоскопії та контролю будови виробів шляхом перенесення видимого зображення з недоступної зони до оператора. Порівнюючи ендоскопи з іншими пристроями, придатними для вирішення аналогічних завдань, і насамперед із малогабаритними телевізійними камерами, що розміщуються в порожнині, потрібно зазначити, що гнучкі ендоскопи мають набагато менші розміри поперечного перерізу. Це дає можливість вводити їх через дуже малі отвори об'єкта в порожнини та канали складного профілю, якщо радіус вигину при повороті ендоскопа в порожнині більше п'яти діаметрів дроту.

### **3.5.2 Фотометричні методи контролю**

Методи, що базуються на вимірі величин, що характеризують світлове випромінювання, шляхом перетворення їх в електричний сигнал та обробки його вторинними блоками. Вони знайшли велике поширення, оскільки добре вписуються в технологічний процес. До таких методів можна умовно віднести фотометричний, денситометричний, колориметричний і деякі різновиди поляризаційного та спектрального методів. Фотометричний метод передбачає вимірювання вторинної освітленості, яскравості, світлового потоку або інтенсивності світлового випромінювання, отриманого після взаємодії з контрольованим об'єктом. Використання тієї чи іншої фізичної величини залежить від конкретної реалізації методу, обраної оптичної системи та первинного вимірювального перетворювача. Денситометричний метод полягає в тому, що вимірюється оптична густина, або коефіцієнт пропускання. Поляризаційний метод відрізняється використанням

поляризованого світла й аналізом поляризації компоненти, що пройшла. Колориметричний метод полягає в аналізі колірних складових світла або їх відношення. При реалізації цих методів основний процес вимірювання або перетворення може бути зведений у багатьох випадках до фотометричного, тому розглянемо його як основний варіант побудови апаратури та відзначимо особливості в реалізації інших методів.

Фотометричний і подібні йому методи можуть бути застосовані для вирішення таких завдань неруйнівного контролю: вимірювання геометричних розмірів і площ, контроль коефіцієнта загасання, пропускання або відбиття, дефектоскопія. Прилади, що реалізують фотометричний метод, зазвичай працюють у прохідному випромінюванні та мають дві оптичні системи. Оскільки первинні вимірювальні перетворювачі світлових величин в електричні сигнали найчастіше мають нелінійні світлові характеристики, а їх стабільність недостатня, застосовують спеціальні способи побудови приладів, щоб ці недоліки мали мінімальний вплив. У приладах для контролю геометричних розмірів часто застосовують спостережні системи, а також фотокомпенсаційний, фотоімпульсний, растровий способи та ін.

Фотокомпенсаційний спосіб передбачає порівняння двох світлових потоків, один з яких частково перекривається контрольованим об'єктом, а інший – спеціальною пластиною, положення якої за рівності світлових потоків визначає геометричний розмір об'єкта. Фотоспостережний спосіб полягає у переміщенні за допомогою спостережної системи фотоелектричного перетворювача, що відзначає положення межі «світло-тінь», створюваної при висвітленні контрольованого об'єкта, та реєстрації його параметрів за положенням перетворювача.

Фотоімпульсні прилади мають найбільше поширення та, по суті, використовують перетворення лінійного розміру в електричний імпульс, тривалість якого пов'язана з вимірюваним розміром і швидкістю руху моделювального елемента. Застосування растрових пристроїв дозволяє дискретизувати світловий потік, що йде від контрольованого об'єкта, й

отримати послідовність імпульсів, число яких пов'язане з розмірами контрольованого об'єкта.

У пристроях на принципі фотоімпульсного перетворювача можуть бути застосовані лінійні матриці на базі приладів із зарядним зв'язком, на виході яких відразу отримують послідовність імпульсів, пов'язаних із поперечним розміром, що істотно спрощує побудову приладів для контролю геометричних розмірів фотометричним способом і забезпечує кращі метрологічні показники.

### **3.5.3 Контроль телевізійними методами**

Основою телевізійних методів нині є переважно ПЗЗ- і КМОН-матриці, що дозволяють перетворити видиме зображення у впорядковану послідовність – відеосигнал [24]. Сигнали, отримані від передавального телевізійного блока, далі можуть використовуватися по-різному: для формування видимого зображення, що аналізується оператором, для логічної обробки сигналів і виділення інформації про контрольований об'єкт або для введення в комп'ютер.

Відзначимо основні переваги телевізійного методу порівняно з візуальним і візуально-оптичним:

1) можливість одночасної оцінки зображення на декількох екранах групою операторів, що особливо істотно під час роботи з мікроскопом, ендоскопом та іншими подібними пристроями;

2) робота з великими зображеннями, одержуваних за рахунок електронного збільшення таким чином, що загальне збільшення становитиме

$$K_y = K_{\text{ОПТ}} K_{\text{ВД}} ; \quad (3.4)$$

3) передача й аналіз зображення практично на будь-якій відстані від контрольованого об'єкта;

4) можливість запису, обробки зображення та його поліпшення шляхом усунення перешкод із використанням методів, широко застосовуваних у телеметричних системах;

5) простота проведення контролю для об'єктів різної форми;

б) широкі можливості автоматизації контролю та використання його результатів, оброблених на комп'ютері, для їх фіксації, аналізу, а також управління ходом технологічного процесу.

Більшу частину цих переваг дозволяє реалізувати апаратура або пристрої, які можуть бути побудовані на базі серійних блоків і систем. Такі пристрої називають системами промислового телебачення та телевізійної автоматики. Крім того, деякі спеціальні пристрої, що створюють на виході видиме зображення, по суті, побудовані на основі принципів, характерних для телевізійної техніки.

#### **3.5.4 Інтерференційні методи контролю**

Відмітною рисою інтерференційних методів оптичного контролю є взаємодія двох потоків світла. До інтерференційних методів належать: інтерферометричний, дифракційний, фазово-контрастний, рефрактометричний і голографічний. Вони базуються на зміні енергії та фази вторинних потоків після взаємодії з контрольованим об'єктом, його елементами або частинами. Оскільки величиною, що визначає набіг фази, є довжина хвилі, інтерференційні методи забезпечують вимірювання та контроль параметрів об'єктів до часток довжини хвилі. Зазвичай похибка або роздільна здатність такого роду апаратури становить  $0,1 \lambda$ . У зв'язку з високою роздільною здатністю та чутливістю цих методів велика увага має бути приділена незмінності умов контролю, зокрема числі й параметрів навколишнього середовища. Інтерференційні методи успішно застосовуються для високоточного вимірювання геометричних розмірів, фізико-хімічних властивостей (насамперед оптичних), рідше – для дефектоскопії та контролю внутрішньої будови виробів.

### 3.5.5 Голографічні методи

Унікальні властивості лазерного випромінювання зробили реальним застосування голографічних методів у неруйнівному контролі. Як відомо, голограма – це отримана певним чином фотопластинка з відбитими на ній інтерференційними лініями, під час висвітлення якої когерентними коливаннями формується потік світла, що створює видиме об'ємне зображення сфотографованого об'єкта. Безпосереднє використання властивостей фіксованого тривимірного зображення виробу в неруйнівному контролі має таке саме значення, як звичайна фотографія, – отримання і зберігання документа, однак така, що містить набагато більшу інформацію, оскільки зображення має об'ємність і розподіл світла, зареєстрованого з точністю до часток його довжини хвилі.

Голограми можуть бути отримані фізичним шляхом за допомогою оптичних установок або розрахунковим шляхом за допомогою комп'ютера та спеціальних графічних пристроїв (бінарні голограми). Оскільки голограму отримують за рахунок інтерференції світлових хвиль, що пройшли різний шлях до реєструвальної фотоплівки, необхідні висока когерентність, монохроматичність і стабільність джерела світла, що особливо істотно при великих різницях ходу променів. Найкращі із сучасних лазерів можуть забезпечити виконання необхідних умов при відстанях до 30 м. Дві інтерференційні лінії на голограмі знаходяться на відстані  $l_u = \lambda / (\sin \alpha / 2)$ , де  $\alpha$  – кут між напрямками сигнального й опорного променів. Оскільки найменша відстань між лініями на голограмі приблизно дорівнює довжині світла, тобто у видимому діапазоні 0,35–0,75 мкм, то плівка для голографії повинна мати високу роздільну здатність – 2000–5000 рядків/мм. Робота з такою плівкою вимагає великої освітленості та значного часу експозиції. Під час експозиції необхідно витримувати сталі показники навколишнього середовища, оскільки їх зміни не повинні призводити до появи збільшень електричної довжини в одного з променів більш ніж на чверть довжини хвилі, інакше структура інтерференційних смуг буде порушуватися

(змазуватися, розпливатися). Зазначені особливості ускладнюють широке впровадження голографічних методів у неруйнівному контролі якості.

Розрахункові (бінарні) голограми отримують шляхом обчислення для конкретних умов контролю результуючих амплітуд і фаз у площині голограми на комп'ютері. Отримані значення виводяться на будівник графічного зображення або передаються по каналах зв'язку в приймальний центр. Потім зображення перефотографовуються у зменшеному масштабі так, щоб лінії голограми на фотографії знаходилися на відстанях, порівнянних із довжиною хвилі світла, що відновлює зображення. Розрахунковий спосіб створення голограм дозволяє мати їх для ідеальних об'єктів, що реально не існують, виготовляти фільтри з наперед заданими властивостями та передавати голографічну інформацію. Особливо ефективно для цілей неруйнівного контролю застосування розрахункових голограм, коли виріб повинен мати форму, точно описувану математичними формулами (циліндр, сфера, параболоїд і т. д.) при малих допустимих відхиленнях від неї.

### **3.6 Практичні схеми реалізації оптичного контролю**

#### **3.6.1 Пристрій і принцип роботи вимірювального мікроскопа**

До складу типового мікроскопа входять: освітлювач, предметний столик, що переміщається щодо корпусу мікроскопа, і збільшувальна частина. Найбільш складні мікроскопи для вимірювальних цілей містять електронні системи цифрового відліку, а також перетворювальну телевізійну установку для передачі та обробки зображення. Як правило, мікроскоп працює з джерелом штучного світла, що створює велику освітленість контрольованого об'єкту необхідного спектрального складу та пряму світла.

Вихідний світловий потік найчастіше має вигляд паралельного пучка променів або спеціальну будову (сходиться або розходиться, зі світлими або темними місцями, із різними мітками і т. д.).



Збільшувальна частина мікроскопа призначена для отримання зображення, зручного для оперативного аналізу при контролі різних об'єктів у вибраному режимі. Типовий варіант побудови збільшувальної системи мікроскопа зображений на рис. 3.3 [1]. Для розширення можливостей у збільшувальній частині мікроскопа також є елементи, що змінюють світловий потік, а освітлювач може розміщуватися по-різному ( $OC_1$  або  $OC_2$ ).

Від освітлювача  $OC_1$  світло падає на лінзу  $L_3$  (робота у світлому полі) або  $L_4$  (робота в темному полі) та через діафрагму  $D_3$  і маску  $MC$  направляється на складні дзеркала  $DZ_2$  і  $DZ_3$ . Дзеркало  $DZ_2$  виконане прозорим і відбиває світловий потік, що пройшло крізь лінзу  $L_3$  у лінзовий об'єктив  $OB$ , що висвітлює ділянку контрольованого об'єкта  $KO$ . Через цей самий об'єктив  $OB$  і дзеркало  $DZ_2$  промені світла після взаємодії з контрольованим об'єктом спрямовуються для аналізу крізь фільтр  $\Phi_3$  і лінзи  $L_6$  до дзеркал  $DZ_4$  і  $DZ_5$ . Таким шляхом проходить світловий потік під час роботи у світлому полі, коли кут падіння променів світла  $\theta$  близький до нуля. Під час роботи в темному полі, коли добре відбивна полірована поверхня здається чорною, світловий потік через периферійну частину лінзи  $L_4$  потрапляє на дзеркало  $DZ_3$  і далі на дзеркало  $DZ_6$ , яке має назву епіоб'єктива, що виконується у вигляді круглого кільцеподібного металевого дзеркала з внутрішньою параболічною відбивною поверхнею, яке формує косе ( $\theta \neq 0$ ) освітлення. Центральна частина світлового потоку в цьому варіанті висвітлюється перекривальною діафрагмою  $D_3$ , щоб не було прямого відбиття світла в об'єктив. Хід променів світла після взаємодії з контрольованим об'єктом в обох випадках однаковий.

Промені світла, що несуть корисну інформацію у вигляді зображення ділянки контрольованого об'єкта  $KO$ , відбиті від дзеркала  $DZ_4$ , крізь окуляр  $OK$  спостерігаються оператором. Якщо прибрати дзеркало  $DZ_4$ , то промені потрапляють в окуляр  $L_8$ , що після відбиття їх від дзеркала  $DZ_5$  формує зображення на пластині  $ПЛ$ , яка може бути матовим екраном під час роботи в проєкційному режимі або фотопластинкою під час фотографування.

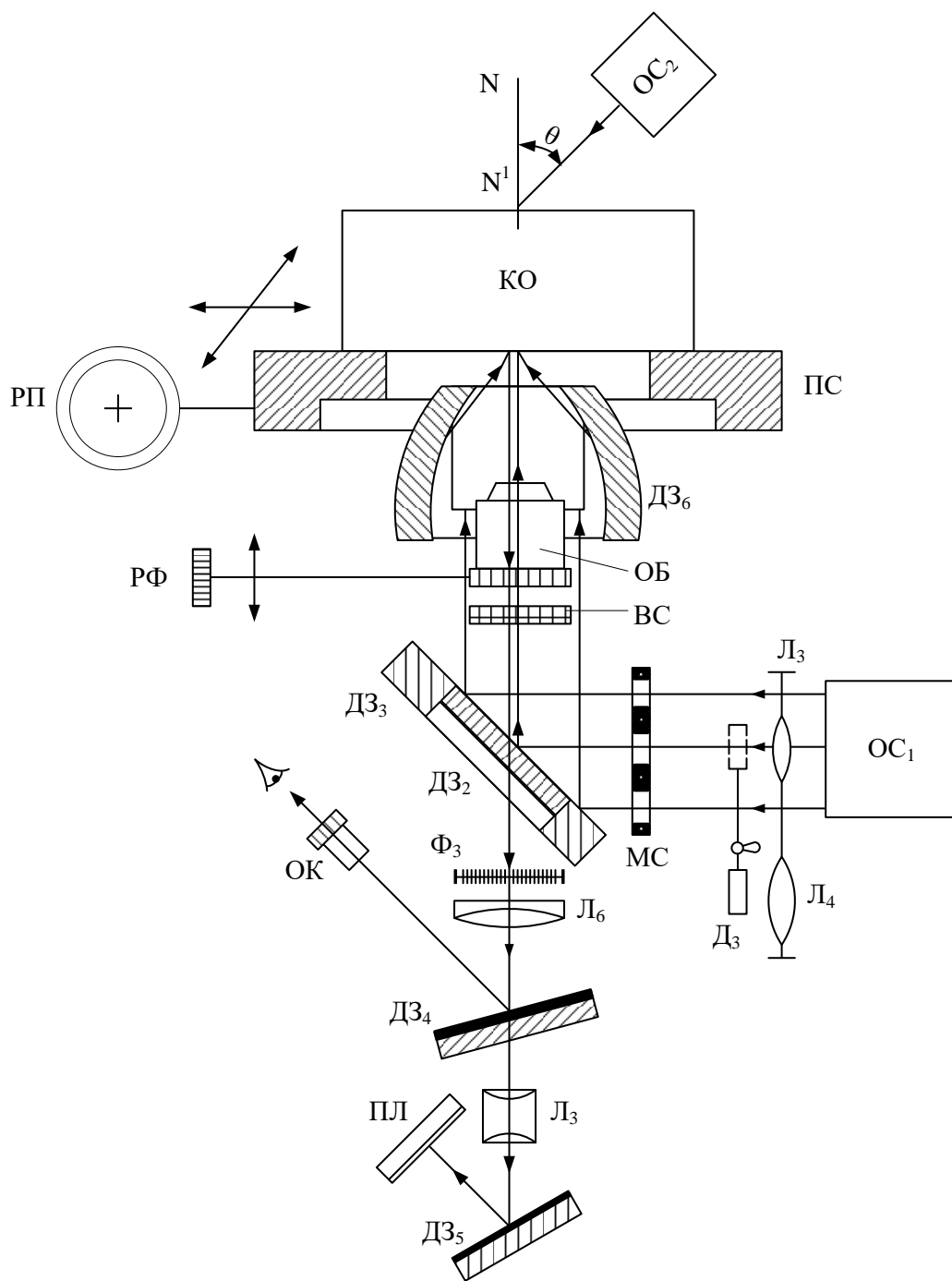


Рисунок 3.3 – Функціональна схема вимірювального мікроскопа: КО – контрольований об'єкт; ПС – предметний столик; ОБ – лінзовий об'єктив; ВС – вимірювальна система; ОС – освітлювач; ДЗ – дзеркало; Л – фокусувальні лінзи; МС – маска; Д – діафрагма; Ф – фільтр

Отримання чіткого зображення забезпечує його фокусування шляхом переміщення об'єктива ОБ у напрямку лінії візування (головної оптичної осі) за допомогою ручки фокусування РФ, пов'язаної з відліковим

мікрометричним пристроєм відліку відстані. Безпосередньо в об'єктиві, окулярі або біля них установлюється вимірювальна сітка ВС із розподілами, ціна яких залежить від збільшення мікроскопа. Ця сітка забезпечує проведення відліків довжини в площині, перпендикулярній до лінії візування, і може бути проградуйована за еталонами або за допомогою мікрометричних відлікових пристроїв.

Предметний столик ПС є базою, на якій розміщується контрольований об'єкт КО, для чого до нього надається набір приладдя: спеціальні затиски, пружинні тримачі, додаткові кільця та насадки тощо. Предметний столик дозволяє переміщати об'єкт КО у напрямках, перпендикулярних до лінії візування, що здійснюється ручками відповідних координатних переміщень РП, пов'язаних із предметним столиком ПС відліковими мікрометричними пристроями.

Освітлювальна частина мікроскопа ОС<sub>2</sub> для роботи в прохідному освітленні виконана у вигляді лампи розжарювання об'єктива, фільтра та діафрагми, вкладених у загальний корпус. Такий освітлювач може легко розміщуватися в необхідному положенні при оптимальному куті падіння світла та фіксувати його.

Залежно від розв'язуваної задачі контролю якості мікроскоп можна використовувати для роботи в таких режимах освітлення: у прохідному та відбитому світлі різного спрямування; із білим або монохроматичним світлом, довжина хвилі якого визначається фільтрами; із поляризованим і неполяризованим світлом, при висвітленні світловим потоком різної структури, створюваної масками. У частині мікроскопа, де відбувається обробка світлового потоку після взаємодії з контрольованим об'єктом, також можливі різні режими роботи, застосування яких доцільне з урахуванням його оптичних властивостей. Оптична система більшості мікроскопів налагоджується зазвичай на певну довжину хвилі (частіше 0,56 мкм), тому для отримання зображень найкращої якості використовують монохроматичне світло. Відзначимо найбільш поширені режими роботи мікроскопів.

Основний режим роботи мікроскопа – освітлення білим світлом. Для отримання зображень, на яких чітко виділяється інформація про відхилення об'єкта від норми, встановлюють різні світлофільтри, причому смуга їх пропускання може бути близькою до довжини хвилі, що несе корисну інформацію, або, навпаки, є додатковою до неї, що підвищує контрастність зображення та будуть різко виділятися сторонні елементи і деталі: дефекти, різні включення і т. п. Робота в темному полі особливо ефективна під час вивчення поверхневих дефектів або при контролі поверхонь із особливими оптичними властивостями, а також при контролі прозорих об'єктів.

### **3.6.2 Схеми побудови ендоскопів**

Залежно від виду контролюваного об'єкта, умов і цілей проведення контролю кінцева частина ендоскопа може компонуватися шляхом різних сполучень елементів оптичних систем (лінз, призм, дзеркал тощо) і джерела освітлення. На рис. 3.4 показано кілька схем типових варіантів контролю та розміщення основних елементів, що забезпечують різні варіанти огляду внутрішньої поверхні контролюваного об'єкта. Ендоскоп містить: освітлювальний джгут 1, освітлювальну оптичну систему 2, джерело світла, об'єктив 3, оглядовий (регулярний) джгут 4, окуляр, захисну оболонку 5 і пристрої керування. За технологічними ознаками ендоскопи виконуються *жорсткою, напівжорсткою і гнучкою* конструкціями.

Ендоскопи жорсткої конструкції легше фіксуються в зоні контролю. Жорсткі ендоскопи виготовляють на базі лінзово-дзеркальних оптичних систем, що містять до 50 оптичних елементів, а їх можливості подібні до мікроскопів. Ендоскопи гнучкої конструкції найбільш універсальні, оскільки добре вводяться в порожнини складної конфігурації по криволінійних каналах, провідних до порожнини, і виготовляються на основі волоконно-оптичних світловодів, зібраних у джгути. Під час використання таких ендоскопів необхідно мати на увазі, що доставлене до оператора зображення дещо спотворюється порівняно з тим, що проектується на вхідний торець

світловідного джгута. Зокрема, елементарні світлові потоки деполаризуються, по-різному запізнюються в часі, зображення має зернисту структуру, а контраст дещо порушується за рахунок різного загасання світла в окремих волокнах джгута та різного пройденого шляху, наприклад через непередбачувані вигини та переплетення волокон, а також неідеальності їх відбивної поверхні.

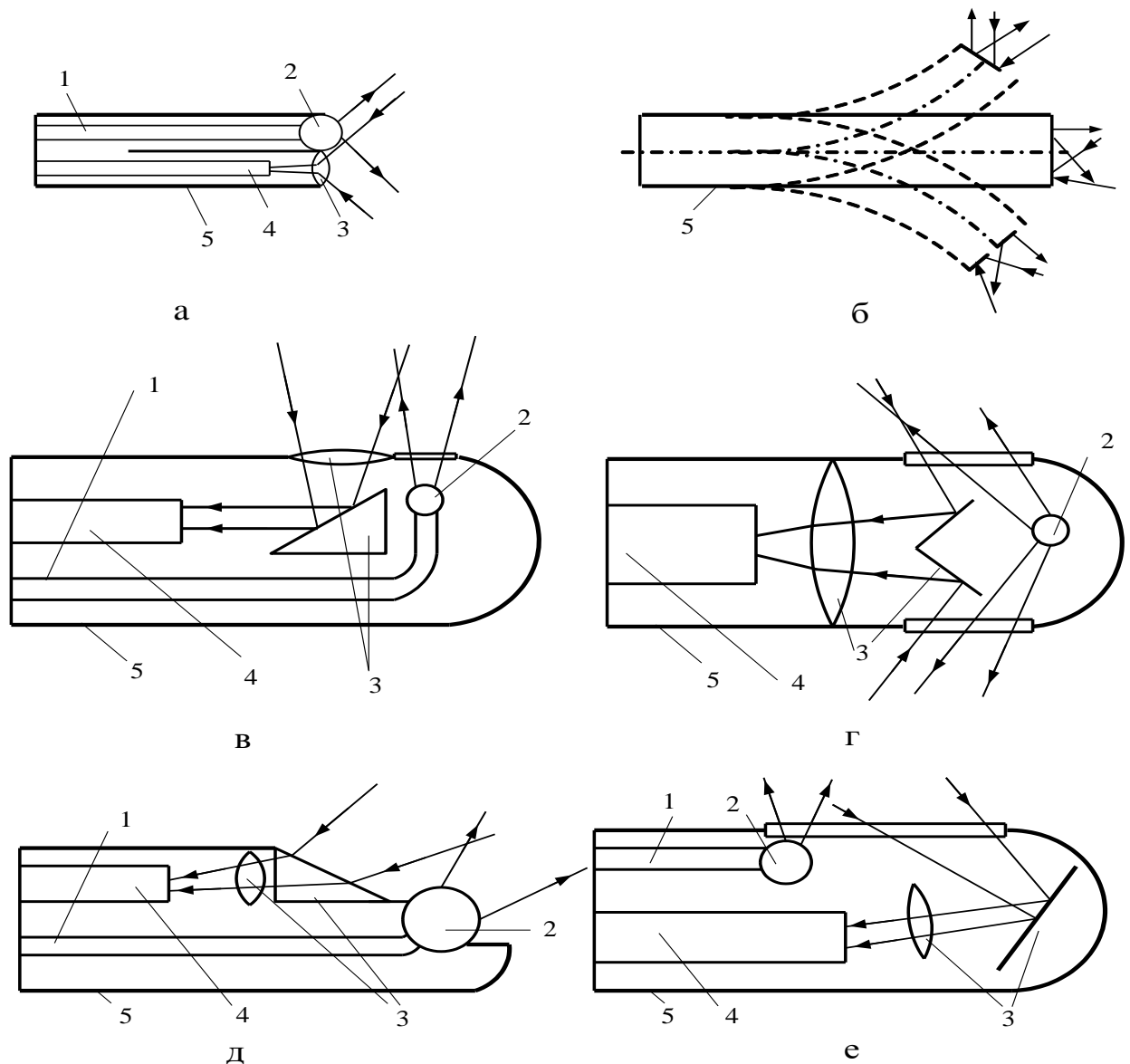


Рисунок 3.4 – Основні види ендоскопів для огляду внутрішніх поверхонь: а – прямий; б – регульований у півсфері; в – бічний; г – панорамний; д – кутовий; е – ретроспективний (1 – освітлювальний джгут, 2 – освітлювальна оптична система, 3 – об'єктив, 4 – оглядовий джгут (регулярний), 5 – захисна оболонка)

Оскільки ендоскоп є фактично пристроєм, що переносить зображення в просторі та працює в реальному масштабі часу, він може успішно використовуватися з іншими пристроями фіксації та обробки зображень, наприклад телеапаратурою. Умови освітлення легко змінюються, оскільки джерело світла винесене за межі порожнини та його потужність можна збільшити до необхідного значення, незважаючи на габарити.

Роздільна здатність ендоскопа гнучкої конструкції обмежена роздільною здатністю волоконно-оптичного джгута й оптичної частини ендоскопа. Щоб повніше використовувати можливості ендоскопа, прагнуть до приблизної рівності лінійного дозволу в полі зору й роздільної здатності регулярного джгута. У цьому разі мінімально допустимий діаметр торця джгута становитиме

$$D_{\text{ж}} = \frac{D_{\text{ПЗ}} \delta}{\delta_{\text{ж}}}, \quad (3.5)$$

де  $D_{\text{ПЗ}}$  – лінійний розмір поля зору ендоскопа, мм;  $\delta$  і  $\delta_{\text{ж}}$  – роздільні здатності за полем зору ендоскопа та волоконно-оптичного джгута відповідно, мм<sup>-1</sup>.

За допомогою ендоскопа можна оцінити лінійні розміри елементів виробу шляхом порівняння їх між собою або за вимірювальною шкалою, однак точність у цьому разі невисока, оскільки важко визначити збільшення ендоскопа (масштаб зображення).

### **3.6.3 Структурна схема телевізійної установки для оптичного контролю об'єктів**

Основним обладнанням під час реалізації телевізійних методів є промислова телевізійна установка (ПТУ), що становить замкнену телевізійну систему, сигнали якої найчастіше передаються по кабелях. Промислові телевізійні установки є самостійними одиницями та часто можуть бути безпосередньо використані для проведення оптичного телевізійного контролю при відповідному виборі з номенклатурою, що широко

випускається. Структурна схема (рис. 3.5) показує основні функціональні блоки типової ПТУ. Її передавальна частина має від 1 до 32 телекамер (ТК<sub>1</sub>, ТК<sub>2</sub>) із пристроями наведення (ПН<sub>1</sub>, ПН<sub>2</sub>) та оптичними блоками (ОБ<sub>1</sub>, ОБ<sub>2</sub>). У загальному випадку оптичні блоки ОБ<sub>1</sub>, ОБ<sub>2</sub> – це набір об'єктивів із різними оптичними системами, зміна яких може проводитися дистанційно. Пристрої наведення ПН<sub>1</sub>, ПН<sub>2</sub> – механічного типу – можуть повертати телевізійну камеру дистанційно за сигналами керування на кут  $\pm 180^\circ$  у горизонтальній площині та на кут  $\pm (20 - 45)^\circ$  у вертикальній площині. Всі електричні з'єднання телекамер між собою та з приймальною частиною виконані за допомогою розподільних коробок РК<sub>1</sub> на передавальній і РК<sub>2</sub> на приймальній сторонах. З'єднуються ці коробки між собою магістральним коаксіальним кабелем МК<sub>1</sub>, по якому йдуть відеосигнали, імпульси синхронізації та розгортки, кабелем керування КК<sub>2</sub>, по якому передаються живлячі напруги, а також сигнали керування телекамерами і блоками. Типова довжина кабелів становить 100–1000 м, з лінійним підсилювачем ЛП і додатковими кабелями (МК<sub>3</sub> і КК<sub>4</sub>) до 5 км. На приймальній стороні відеосигнали від розподільної коробки РК<sub>2</sub> через центральний блок комутації та керування БК надходять на підсилювач-розподільник ПР, що забезпечує електричними сигналами всі відеоконтрольні пристрої ВКП (монітори), кількість яких може бути також різною (частіше 1–4). Відеоконтрольні пристрої ВКП<sub>1</sub>, ВКП<sub>2</sub> забезпечені пультами керування ПК<sub>1</sub>, ПК<sub>2</sub>, частина яких зроблена виносними, що дозволяє керувати дистанційно режимом роботи системи в цілому.

Типові промислові телевізійні системи забезпечують 8–10 градацій яскравості при освітленості 50–300 лк і чіткості зображення близько 600 ліній у растрі. Застосування перетворювачів «світло-сигнал» спеціального виконання дає можливість використовувати телевізійні методи в разі невидимих випромінювань (інфрачервоні, рентгенівські). Телевізійні сигнали можуть бути приведені до більш зручного вигляду блоками вторинної обробки БВО.

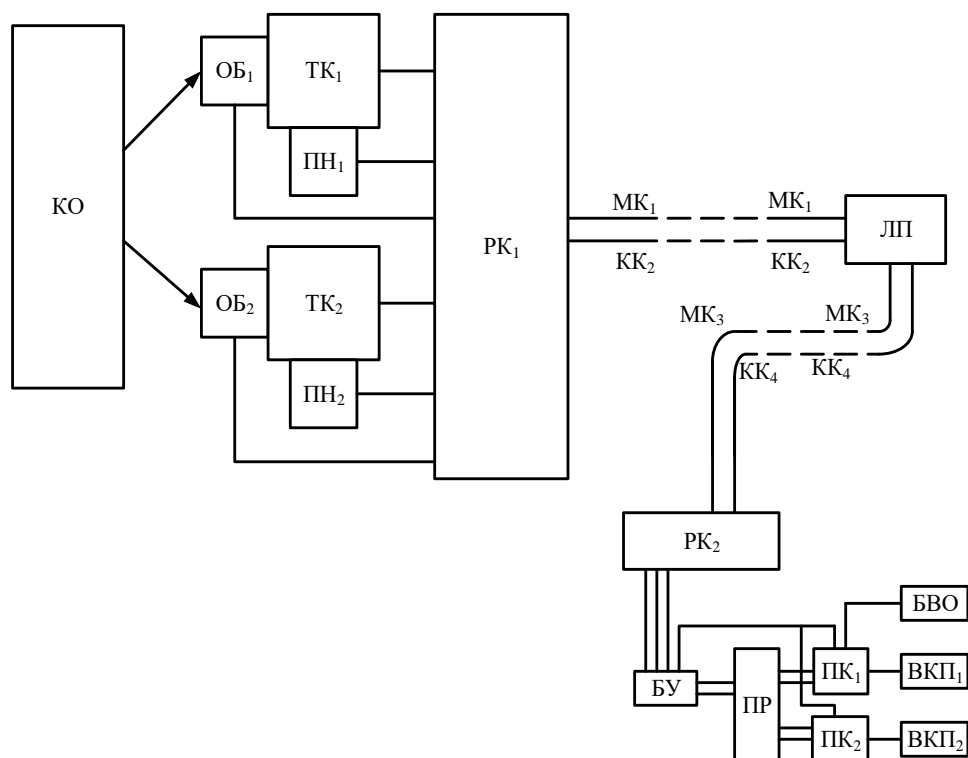


Рисунок 3.5 – Структурна схема промислової телевізійної установки

У багатьох випадках має сенс застосовувати кольорові телевізійні установки або проводити колірне контрастування зображення, що підвищує достовірність контролю. Телевізійні методи дозволяють виявляти дефекти, мінімальний розмір яких дорівнює

$$l_{\min} = \frac{l_{\text{екр}}}{K_y m}, \quad (3.6)$$

де  $m$  – число рядків або число елементів зображення в рядку.

### 3.6.4 Застосування телевізійної автоматики для оптичного контролю об'єктів

Контроль розмірів об'єктів може здійснюватися в напівавтоматичному й автоматичному режимах різними способами. При цьому похибки вимірювань в обох випадках залежать від обраного способу контролю й у кращому разі становлять кілька сотих часток відсотка. Напівавтоматичні способи відрізняються тим, що визначення вимірюваної величини виконує оператор за допомогою зображення на екрані відеоконтрольного пристрою.



Автоматичні методи передбачають отримання вимірюваної величини безпосередньо автоматом у вигляді показання вихідного індикатора, цифрового коду або інших сигналів.

Контроль форми виробів і вимірювання геометричних розмірів за зображенням на екрані відеоконтрольного пристрою (напівавтоматичний контроль) виконують такими способами: із координатною сіткою або контрольною лінійкою, повним або частковим вимірюванням.

Спосіб повного вимірювання відстані між краями чи характерними точками виробу застосовують для контролю великогабаритних виробів або напівфабрикатів. Він полягає в тому, що на відеоконтрольному пристрої добиваються збігу цих точок із центром екрана шляхом повороту телекамери. Вимірявши кути її повороту щодо центрального положення ( $\alpha_1$  і  $\alpha_2$ ) і знаючи відстань від телекамери до виробу, можна знайти шуканий розмір:

$$L = L_0 (tg \alpha_1 + tg \alpha_2), \quad (3.7)$$

провівши обчислення за допомогою спеціального пристрою. Похибка відомих напівавтоматів повного виміру для значень довжин 2–60 м може становити 3–50 мм, тобто досягає 0,1 %.

Способи вимірювання часткової відстані полягають у визначенні не всього розміру  $L$ , а лише його крайової частини із двох боків, тобто фактично лише прирощення довжини щодо сталої бази  $L_0$ . На рис. 3.6 показано розташування телекамер і зображення для двох варіантів застосування цього способу. Природно, якщо база  $L_0$  відома з високою точністю і досить стабільна, відносна похибка вимірювань істотно знижується та визначається сумою абсолютних похибок вимірювання та установки бази. Реалізація цього способу може проводитися з використанням однієї (рис. 3.4 а) або двох (рис. 3.4 б) камер і відеоконтрольних пристроїв. Вимірявши за екраном прирощення розміру щодо бази, можна знайти ширину:

$$L = L_0 + K_e \Delta l, \quad (3.8)$$

де  $K_e$  – градувальний коефіцієнт екрана відеоконтрольного пристрою;  $\Delta l$  – розмір, прочитаний на екрані.

Автоматичне вимірювання геометричних розмірів телевізійними методами може здійснюватися такими способами: часово-імпульсне перетворення, оптична дискретизація зображення та спосіб граничних струмів.

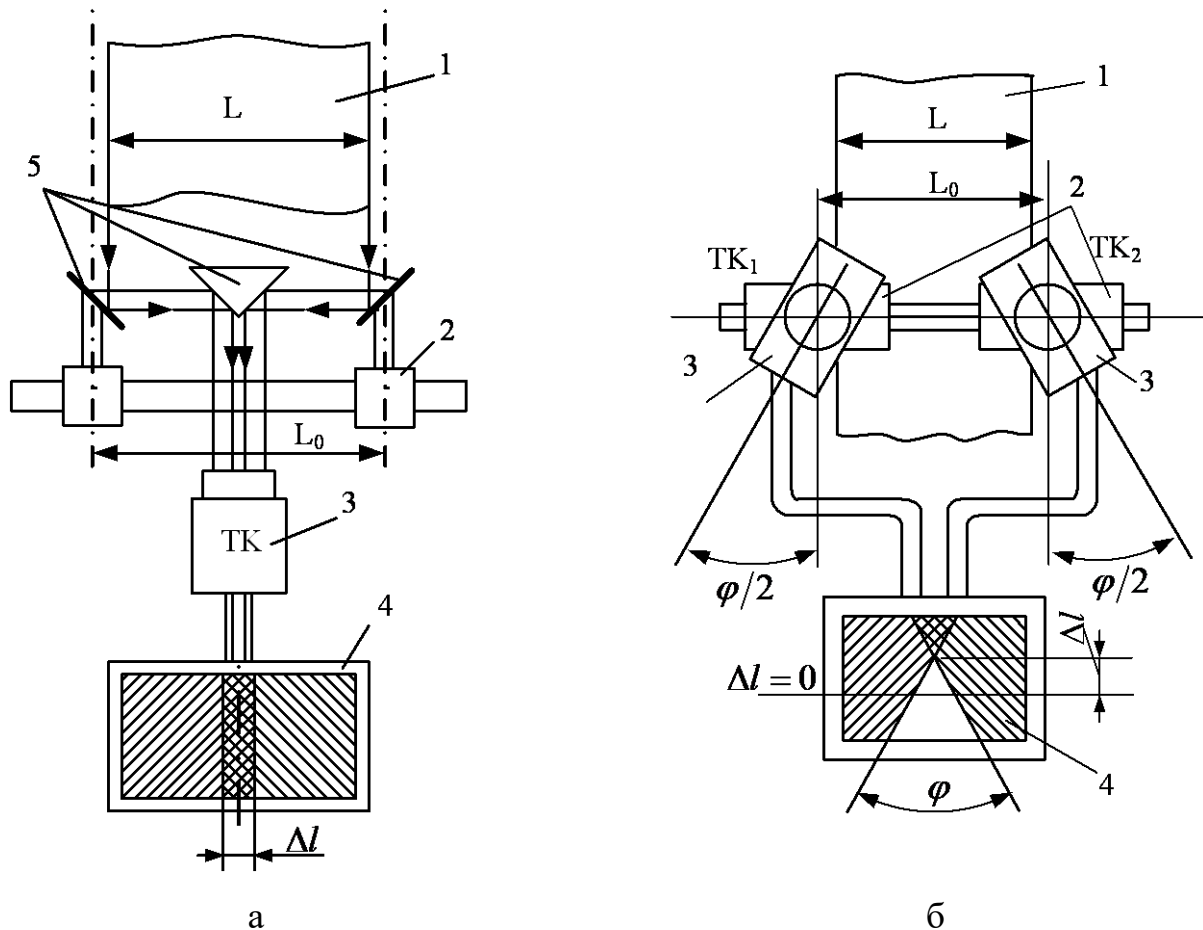


Рисунок 3.6 – Схеми телевізійних вимірювань розмірів: а – одною телекамерою; б – двома телекамерами (1 – контрольований об'єкт, 2 – пристрій установки бази, 3 – телевізійні камери, 4 – відеоконтрольний пристрій, 5 – дзеркала)

### 3.6.5 Принцип роботи та схема інтерферометра

Для вирішення завдань неруйнівного контролю можуть застосовуватися *інтерферометри* – стандартні вимірювальні прилади, поширені в техніці точних геометричних вимірювань. Вони дозволяють

вимірювати різні геометричні розміри, зокрема товщини прозорих покриттів, з похибкою до 0,1 мкм, шорсткості та нерівності на досліджуваній поверхні такого самого порядку. На рис. 3.7 а показана схема конструкції мікроінтерферометра для контролю якості поверхні шляхом порівняння з еталоном поверхні, а на рис. 3.7 б – вигляд зображення в полі зору інтерферометра за наявності дефектів на поверхні (тріщини та виступи).

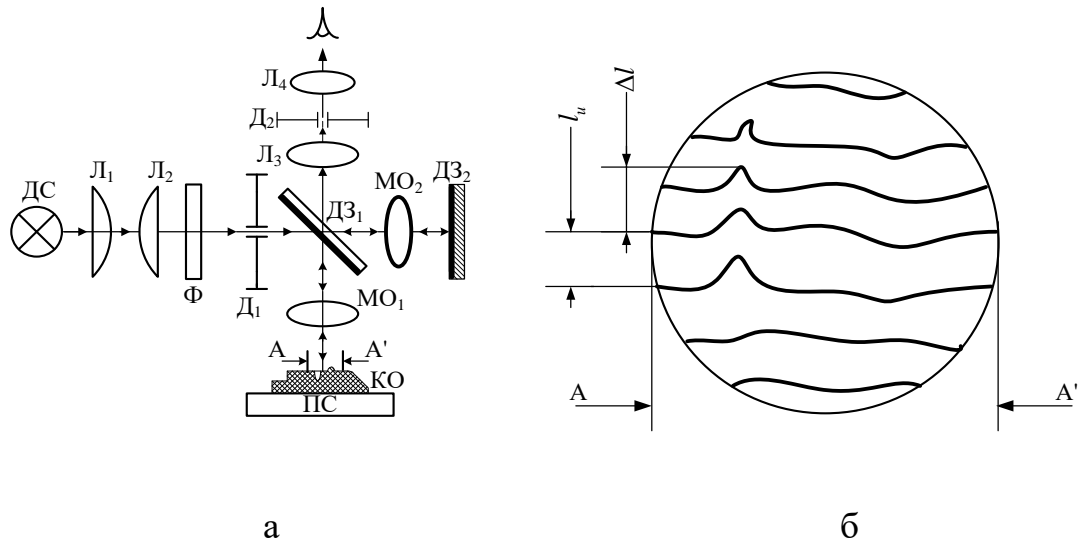


Рисунок 3.7 – Конструктивна схема інтерферометра й інтерференційна картина за наявності виступу та западини

Джерело світла ДС (лампа розжарювання, лазер) за допомогою конденсора  $L_1-L_2$  формує світловий потік. Виділена монохроматичним фільтром  $\Phi$  і діафрагмою  $D_1$  його частина потрапляє на напівпрозоре дзеркало  $D_3$  і ділиться на два когерентні пучки. Один із пучків фокусується на контрольований об'єкт КО, поміщений на предметний столик ПС, а інший – на поверхню еталонного дзеркала  $D_2$ . Відбиті промені через мікροоб'єктиви  $MO_1, MO_2$  і напівпрозоре дзеркало  $D_3$  потрапляють в окуляри  $L_3, L_4$ , що містить ряд лінз, і обмежує діафрагму  $D_2$ . Накладаючись у поле зору, робочі й еталонний світлові потоки утворюють інтерференційну картину.

У разі плоских поверхонь об'єкта й еталона інтерферограма матиме вигляд паралельних світлих (потoki накладаються у фазі) та темних смуг (фази протилежні). Наявність кривизни та дефектів поверхні (тріщин, западин, подряпин, рисок або напливів, виступів, задирів і т. п.) контрольованого об'єкта призводить до появи регулярно змінюваного або місцевої зміни набігу фази відбитого світлового потоку, що призводить до викривлення ліній інтерференційної картини (рис. 3.5 б). Це дозволяє виявити відхилення від площинності, дефекти та нерівності поверхні й оцінити їх величину. Так, при освітленні монохроматичним світлом глибина (висота) нерівності може бути оцінена за виразом

$$h = (\lambda/2)(\Delta l/l_i), \quad (3.9)$$

де  $\Delta l$  – вигин відповідної інтерференційної лінії, а  $l_i$  – інтервал між інтерференційними лініями.

Відношення  $\Delta l/l_i$  оцінюється оператором або розраховується після вимірювання відповідних величин за допомогою вимірювальної сітки або мікрометричного гвинта інтерферометра. Таким чином, легко вивчаються мікропорушення поверхні розміром 0,1–1 мкм. Фокусуючи на різкість інтерференційні смуги послідовниками на граничні точки дефекту або по глибині прозорого контрольованого об'єкта, можна визначати дефекти у вигляді рисок або тріщин глибиною 20–100 мкм при ширині близько 0,25 мкм.

Переміщення контрольованого об'єкта або еталонного дзеркала призводить до зміщення інтерференційних смуг, за якими можна знаходити абсолютні розміри елементів контрольованого об'єкта, товщину покриттів, глибину отворів тощо із високою точністю за відпрацьованими стандартними методиками.

### **3.6.6 Методики голографічного контролю**

Для проведення оперативного контролю необхідно здійснювати порівняння декількох предметів або змін, що відбуваються в одному й тому самому предметі. Для цього розроблені різні методики голографічного контролю. Частіше за інших контроль ведуть шляхом отримання інтерференційної картини на випробуваному об'єкті (метод «живих смуг») або методом подвійної експозиції (метод «заморожених смуг»).

Якщо в область, де знаходиться відновлене зображення, помістити сфотографований на голограму предмет або йому подібний, то голографічне зображення та предмет, зважаючи на точний збіг світлових хвиль, здаватимуться єдиним цілим, маючи підвищену яскравість і контрастність. При суміщенні голографічного зображення виробу, що має номінальні параметри (контрольний зразок), із випробуваним збіг амплітуд і фаз у деяких місцях будуть порушені через відхилення його параметрів від номінальних значень і на випробуваному виробі з'являться інтерференційні смуги, викликані різницею ходу когерентних світлових променів від голограми та випробуваного об'єкта. Отримана інтерференційна картина залежить від конкретних відмінностей голографічної копії контрольного зразка та реального виробу, що дозволяє легко та точно виявляти відхилення у випробуваному виробі від контрольного зразка.

Метод подвійної експозиції полягає в накладенні двох голограм фізичних зображень на одну плівку. Внаслідок відновлення такої складної подвійної голограми також виходить система інтерференційних смуг, що помітно виділяє ту область, де є відмінності в експонованих об'єктах.

Голографічні методи виявились ефективними для проведення неруйнівного контролю в таких випадках:

1. Контроль геометричних розмірів, оптичних властивостей і виявлення дефектів у високоякісних напівфабрикатів та виробів шляхом порівняння з еталоном або розрахунковою голограмою.

2. Аналіз мікропереміщень і змін ділянок або деталей об'єктів із часом. Такий аналіз проводиться шляхом порівняння зробленої раніше голограми об'єкта з його справжнім станом.

3. Контроль виробів у динамічних режимах, викликаних механічним навантаженням, нагріванням (охолодженням) або вібраційними навантаженнями. У всіх цих випадках відбувається зміна геометрії виробу та проводиться порівняння нового стану виробу з його колишнім топографічним зображенням. При навантаженні деформація в областях, ослаблених наявністю відхилень від норми або дефектів, відбувається викривлення інтерференційних ліній (рис. 3.8 б). Нагрівання або охолодження використовують при голографічному контролі виробів, що працюють при змінюваних температурах, наприклад елементи та блоки радіоелектронної апаратури (рис. 3.8 в, г).

Цей вид контролю має великі перспективи, оскільки деформації від збільшення температури надзвичайно малі. Найпростішим варіантом голографічного контролю вібрувального об'єкта при періодичному характері коливань є реєстрація голограми в процесі вібрації. Оскільки голограма формується протягом часу, набагато більшого за період коливань вібрувальної деталі, найбільший вплив на фотоплівку дають два її крайні положення, коли миттєві значення швидкості дорівнюють нулю. У результаті виходять ніби дві голограми, накладені на одну плівку.

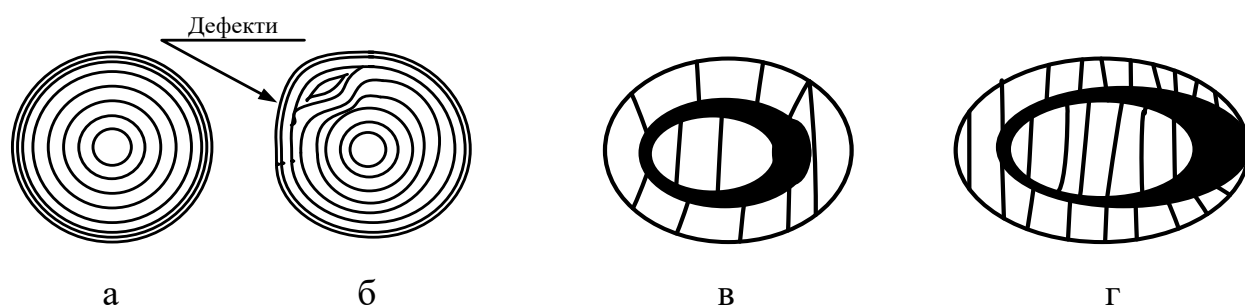


Рисунок 3.8 – Приклади голографічних інтерферограм за наявності дефектів: а – до механічного навантаження; б – після навантаження; в – потужного транзистора при нормальній температурі; г – після нагрівання

4. Контроль якості прозорих і напівпрозорих об'єктів, які важко відрізнити від фону, однак призводять до зміни електричної довжини ходу променів.

5. Вивчення мікроструктури поверхні виробів, що визначає їх якість. Низька якість поверхні випробуваного виробу порівняно з еталоном призводить до погіршення чіткості голограми і проявляється як вплив шуму.

Таким чином, голографічні методи дають можливість проводити контроль із високою роздільною здатністю, проте, зважаючи на підвищення вимог до точності виготовлення та якості поверхні порівнюваних виробів, складності контролю, застосовуються для перевірки дрібносерійної продукції.

### **3.7 Теми практичних (семінарських) занять і контрольні питання до розділу 3**

#### **Теми практичних (семінарських) занять**

1. Будова та принцип роботи вимірювального мікроскопа (п. 3.6.1).
2. Схеми будови ендоскопів (п. 3.6.2).
3. Структурна схема телевізійної установки для оптичного контролю об'єктів (п. 3.6.3).
4. Застосування телевізійної автоматики для оптичного контролю об'єктів (п. 3.6.4).
5. Принцип роботи та схема інтерферометра (п. 3.6.5).
6. Методики голографічного контролю (п. 3.6.6).

#### **Контрольні питання**

1. На які умовні три групи можна розділити методи оптичного контролю? Дайте їх коротку характеристику.
2. Які основні джерела світла вам відомі? Дайте їх коротку характеристику.
3. У чому полягає принцип побудови оптичної системи?

4. Які основні елементи входять до складу оптичної системи?
5. У чому відмінність геометричних аберацій від хроматичних аберацій?
6. Які основні типи первинних перетворювачів оптичного випромінювання вам відомі?
7. Які принципи покладені в основу візуально-оптичного методу контролю?
8. У чому полягає принцип побудови фотометричного контролю?
9. Які основні переваги телевізійного контролю?
10. У чому відмінність інтерференційних методів контролю від фотометричних?
11. У чому полягає принцип побудови голограм? Поясніть переваги цього методу контролю?
12. Які основні принципи побудови вимірювальних мікроскопів? Функціональна схема мікроскопа.
13. На яких елементах базується побудова ендоскопів? Основні види ендоскопів.
14. Які основні блоки входу в структурну схему телевізійної установки?
15. Які основні схеми телевізійних вимірювань об'єктів вам відомі?
16. Які основні принципи використовуються при побудові інтерферометрів?
17. У чому полягає методика голографічного контролю?



## 4. РАДІАЦІЙНИЙ КОНТРОЛЬ

### 4.1 Загальні питання радіаційного контролю

Радіаційний метод контролю базується на взаємодії з матеріалом (об'єктом) іонізуючих (проникних) електромагнітних і корпускулярних випромінювань та реєстрації результатів цієї взаємодії [4–8, 25].

У радіаційному контролі використовують випромінювання подвійної природи: електромагнітних хвиль та елементарних частинок, що мають значення частоти кванта  $3 \cdot 10^{16}$  Гц і більше або відповідно довжину хвилі у вакуумі коротше 10 нм, або енергію кванта більше 124 еВ (близько  $20 \cdot 10^{-18}$  Дж).

Різні іонізуючі випромінювання при діагностиці матеріалів можуть бути отримані від джерел двох основних груп: електронні джерела та радіоізотопні джерела.

До джерел випромінювання, побудованих на основі електронних пристроїв, належать: рентгенівські апарати (мають найбільше застосування), бетатрони, лінійні прискорювачі, мікротрони та деякі інші пристрої.

*Принцип дії електронних джерел* ґрунтується на перетворенні енергії електронів, що рухаються, в енергію різних видів випромінювань. Джерела випромінювання на базі електронних пристроїв можуть створювати рентгенівське випромінювання, гамма-випромінювання, бета-випромінювання. Бетатрони, лінійні прискорювачі та мікротрони безпосередньо створюють потік електронів, а якщо спрямувати його на мішень із певного матеріалу, можна одержати електромагнітне (гальмівне або характеристичне) випромінювання із енергією квантів, що залежить від енергії електронів. Значною перевагою електронних джерел випромінювання є можливість регулювання інтенсивності випромінювання і його спектрального складу, а також повна безпека при вимиканні електроживлення. Недолік – великі габарити й маса, а також необхідність зовнішнього джерела електроенергії великої потужності.

*Радіоізотопні джерела* побудовані на основі ізотопів речовини, що має природну або штучну радіоактивність. Ці джерела звичайно створюють корпускулярне випромінювання (електрони, протони, нейтрони та ін.) з різними енергіями частинок і гамма-випромінювання. Перевагою радіоізотопних джерел є їх портативність і можливість застосування без додаткових джерел енергії. До недоліків таких джерел можна віднести неможливість регулювання спектрального складу випромінювання.

Довжина хвилі іонізуючих випромінювань порівнянна з розмірами молекул та атомів або менша за них, що визначає складний характер взаємодії цих випромінювань із матеріалом контрольованого об'єкта та обумовлює ймовірнісний характер результатів взаємодії. Загальною тенденцією при взаємодії іонізуючих випромінювань із речовиною є збільшення його проникної здатності зі збільшенням енергії квантів.

Найчастіше в апаратурі радіаційного контролю використовують випромінювання, що пройшло через об'єкт. Рідше під час вирішення деяких завдань товщинометрії та контролю властивостей матеріалів використовують зворотно розсіяне випромінювання або перевипромінювання квантів вторинного випромінювання.

Радіаційні методи порівняно з іншими методами неруйнівного контролю мають найбільшу біологічну небезпеку, тому під час їх використання повинні дотримуватися певні організаційні, санітарні норми охорони праці та правила техніки безпеки, значення яких збільшується при підвищенні потужності джерела випромінювання.

Випромінювання, що застосовуються в радіаційному контролі, як електромагнітної природи у вигляді фотонів, так і корпускулярної природи у вигляді потоку частинок, можуть характеризуватися різними фізичними величинами. Однак серед них можна виділити й загальні показники випромінювання: потік енергії, потужність джерела, інтенсивність, експозиційна (поглинена) доза, енергія квантів і спектральна характеристика, що характеризуються такими співвідношеннями:

1. Потік енергії випромінювання  $F$  (Дж/м<sup>2</sup>)

$$F = E/S, \quad (4.1)$$

де  $E$  – сумарна енергія частинок або квантів іонізуючого випромінювання;  
 $S$  – площа перерізу елементарного середовища, у яку проникає випромінювання.

2. Потужність джерела випромінювання

$$W = \Delta E / \Delta t, \quad (4.2)$$

де  $\Delta E$  – сумарна енергія частинок або квантів, що випромінюються за одиницю часу.

3. Інтенсивністю випромінювання (щільністю потоку енергії)  $J$  (Вт/м<sup>2</sup>) називається відношення приросту енергії іонізуючого випромінювання  $\Delta E$ , що проходить через сферу із площею  $S$  за час  $\Delta t$ , тобто

$$J = \frac{\Delta E}{S \Delta t}. \quad (4.3)$$

Інтенсивність випромінювання змінюється обернено пропорційно до квадрата відстані  $R$  від джерела до точки вимірювання. Тому інтенсивність випромінювання вказують на певній відстані від джерела (звичайно 1 м).

Випромінювальна частина джерел, як правило, набагато менша за відстань до контрольованого об'єкта та перетворювача, тому можна вважати, що інтенсивність при збільшенні відстані зменшується обернено пропорційно до його квадрата:

$$J = J_0 \frac{R_0^2}{R^2}, \quad (4.4)$$

де  $J_0$  – інтенсивність випромінювання на відстані  $R_0$ .

Кожен фотон може характеризуватися енергією  $E = h\nu$ , якій може бути поставлена у відповідність певна довжина хвилі  $\lambda$ , що обчислюється за відомою формулою

$$\lambda = ch/E, \quad (4.5)$$

де  $c$  – швидкість світла у вакуумі;  $\nu$  – частота;  $h$  – стала Планка ( $6,6256 \cdot 10^{-34}$  Дж·с).

Енергія кванта випромінювання визначає його проникну здатність й, отже, можливість виявлення дефектів у контрольованих об'єктах різної товщини та густини. Джерела іонізуючих випромінювань можуть створювати одночасно кванти широкого спектрального діапазону енергій, які по-різному взаємодіють із речовиною.

Незалежно від конкретного виду іонізуючого випромінювання під час організації радіаційного неруйнівного контролю можна відзначити дві узагальнені схеми. У першій схемі відбувається аналіз випромінювання, що пройшло через контрольований об'єкт. У другій аналізується розсіяне (відбите) випромінювання.

Радіаційний контроль за першою схемою має найбільше поширення. Цей метод особливо широко застосовується для цілей дефектоскопії та контролю внутрішньої структури різних об'єктів за можливості двостороннього доступу до них при значній товщині (до 0,5 м).

Контроль із розсіяного (відбитого) випромінювання полягає в реєстрації випромінювання в тій самій області, де розташоване джерело. Цей метод радіаційного контролю застосовується для цілей товщинометрії та визначення властивостей матеріалу. Він використовується для діагностики шарів невеликої товщини (до декількох міліметрів). Джерело випромінювання та первинний вимірювальний перетворювач, що реєструє вторинне (відбите) випромінювання, у цьому разі розміщені близько одне від одного, і для зниження дії прямого випромінювання на вимірювальний перетворювач використовують захисні екрани.

## **4.2 Техніка безпеки при радіаційному контролі**

Іонізуючі випромінювання є потенційно найнебезпечнішими із застосовуваних у неконтактному контролі як безпосередньо для персоналу, що здійснює радіаційний контроль, так і для людей, які знаходяться поблизу

від зони проведення контролю. Тому питанням безпечної роботи та охорони праці при радіаційному контролі повинна приділятися велика увага.

Якщо планується щоденне або регулярне проведення контролю іонізуючими випромінюваннями з великою енергією, то виділяються або будуються спеціальні приміщення.

До роботи із джерелами іонізуючих випромінювань та з апаратурою, що містить їх, допускаються спеціально підготовлені особи, які проходять кожні 6 місяців спеціальний інструктаж. Перевірка знань правил безпеки роботи та особистої гігієни, а також медичний контроль, повторюються щорічно. Під час використання іонізуючих випромінювань обов'язково проводиться контроль за рівнем можливого опромінення персоналу.

Під час організації роботи установок та апаратури із джерелами іонізуючих випромінювань необхідно вживати всі можливі заходи до зниження дози, що отримує персонал. Заходи, що дозволяють знизити дозу опромінення, подібні до тих, які використовуються під час захисту від НВЧ-випромінювання, однак з урахуванням інших властивостей іонізуючих випромінювань. Найбільш ефективними заходами захисту є: екранування джерела випромінювання та робочого місця, захист шляхом зменшення часу роботи із джерелом іонізуючого випромінювання, захист віддаленням—шляхом віддалення працівника на безпечну відстань. Захист екрануванням повинен здійснюватись обов'язково з урахуванням спектра випромінювання джерела.

Залежно від класу робіт персонал забезпечують халатами та комбінезонами, шапочками, рукавичками, легким взуттям і за необхідності засобами захисту органів дихання. Під час роботи з особливо небезпечними джерелами випромінювань або в забрудненому приміщенні видаються ізолювальні або додаткові захисні засоби (пневмокостюми, пневмошоломи, фартухи, нарукавники й ін.), і весь персонал повинен бути забезпечений дозиметрами.

### 4.3 Основні ефекти при взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною

Довжина хвилі, що характеризує іонізуючі випромінювання, порівнянна з міжатомними відстанями, тому ці випромінювання взаємодіють із атомними ядрами та електронами оболонок атома, що відрізняє цей процес від розглянутих раніше в розділах 2 і 3 видів випромінювань і визначає більш складний його характер. Як вже відзначалося, взаємодія іонізуючих випромінювань із речовиною призводить до появи теплових, іонізаційних, електричних, люмінесцентних, фотохімічних і біологічних ефектів. Різні види іонізуючих випромінювань мають і спільні риси наслідків взаємодії. Падаючі на речовину кванти випромінювання можуть бути розсіяними або поглиненими, а також можуть викликати появу нових частинок, що вільно рухаються, або фотонів. Процеси взаємодії іонізуючих випромінювань із речовиною носять випадковий (імовірнісний) характер, що необхідно враховувати під час організації неруйнівного контролю. Дуже невелика частина квантів первинного випромінювання може взагалі не взаємодіяти з матеріалом об'єкта, що залежить від атомного номера речовини та енергії квантів.

Під час проходження фотонного випромінювання крізь речовину основні види взаємодії – фотоефект, комптон-ефект й ефект утворення позитрон-електронних пар [5,8,25]. Кожен із цих видів взаємодії домінує в певному діапазоні енергій первинних квантів. При однаковій енергії квантів внесок того або іншого виду взаємодії визначається атомним номером речовини.

Сутність фотоефекта полягає в тому, що енергія первинного кванта  $h\nu_l$  витрачається на виривання електронів (так званих фотоелектронів) із атома речовини та передавання їм кінетичної енергії (наприклад, фотоелектрон  $e_1$  у лівій частині рис. 4.1). Процес описується рівнянням балансу енергії:  $E_l = E_e + E_v$ , де  $E_l = h\nu_l$  – енергія первинного кванта;  $E_e$  – енергія зв'язку електрона в атомі;  $\{E_v = m_0c^2[1 - (\nu/c)^2]^{0,5} - 1\}$  – кінетична енергія

фотоелектрона;  $v_e$ – швидкість фотоелектрона;  $m_0$ – маса спокою електрона;  $c$ – швидкість світла;  $\nu_I$ – частота первинного кванта;  $h$ – стала Планка.

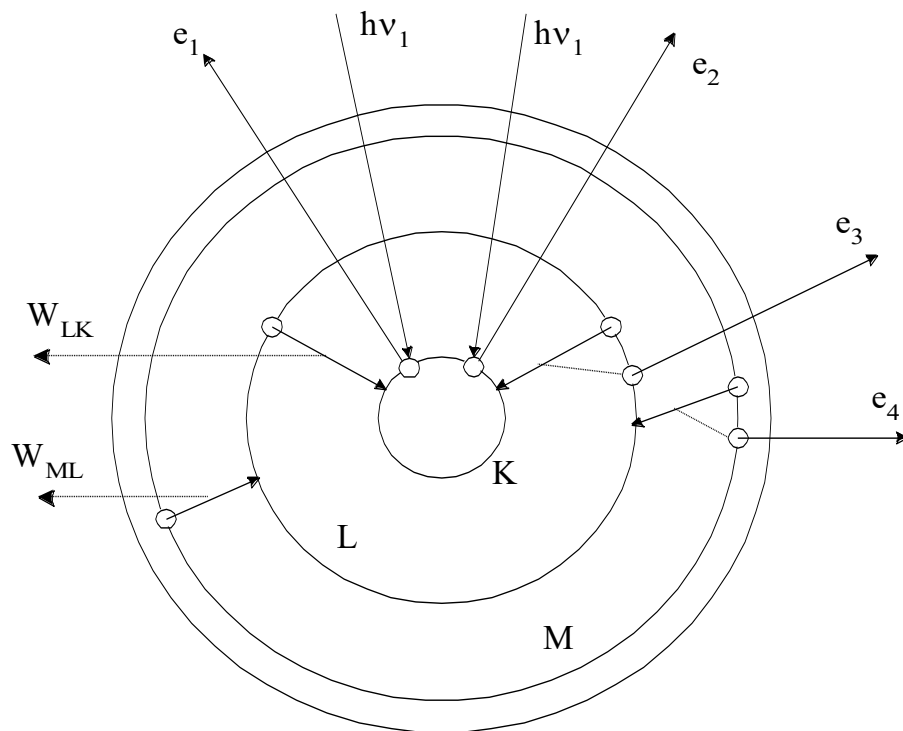


Рисунок 4.1 – Схема поглинання рентгенівських квантів атомом речовини з випускненням фотоелектронів і квантів характеристичного випромінювання (ліворуч) і з випускненням оже-електронів (праворуч)

Електронні шари, або оболонки атома, позначаються літерами К, L, М, N, О, Р (рис. 4.1). Найближчий до ядра шар К характеризується лише одним рівнем енергії, шари L та Р – трьома ( $L_1$ –  $L_3$  та  $P_1$ –  $P_3$ ), шари М та О – п'ятьма ( $M_1$ –  $M_5$  та  $O_1$ –  $O_5$ ), шар N – сімома ( $N_1$ –  $N_7$ ). Залежно від атомного номера  $Z$  кількість стаціонарних рівнів енергії змінюється від 1 до 24.

Зі збільшенням частоти квантів, поряд з іонізацією в зовнішньому шарі за рахунок переходу периферичних електронів (із зовнішніх оболонок) у незв'язаний стан, з'являються вільні електрони, що вирвані із внутрішніх оболонок атомів.

Під час виривання електрона місце, що звільнилося (вакансія), не залишається порожнім, на нього переходить електрон із оболонки, що

знаходиться вище (рис. 4.1). Цей процес супроводжується випусценням кванта із частотою  $\nu = (W_i - W_j) / h$ , тобто випромінюванням рентгенівського характеристичного випромінювання. Переходи електронів на рівень K дають лінії характеристичного K-випромінювання, переходи на рівні L – лінії L-випромінювання і т. д. Робота виривання електрона із шару L менша від роботи виривання із шару K, тому частота характеристичного K-випромінювання більша за частоту L-випромінювання і тим більше M-, N-випромінювань і т. д. Енергія квантів характеристичного випромінювання залежить лише від роду атомів, що його випустили, тобто від їх атомного номера Z. Тому, збудивши у невідомій речовини характеристичний спектр, можна за енергією його ліній визначити, які атоми входять до складу речовини.

Розглянута схема поглинання квантів, показана ліворуч на рис. 4.1, не є єдиною. Можливий також розвиток процесу поглинання за іншою схемою, зображеною праворуч на рис. 4.1. Енергія, що вивільняється під час переходу електрона з верхнього рівня на нижній, витрачається не на випусцення кванта характеристичного випромінювання, а на виривання електрона  $e_3$  із вищої оболонки, (так званий Оже-ефект). На місце, що звільнилося, переходить електрон із вищого шару, виривається новий оже-електрон  $e_4$  із вищої оболонки й т. д. Таким чином, процес поглинання первинного кванта  $h\nu_1$  може супроводжуватися випусценням атомом фотоелектронів ( $e_1, e_2$ ) і квантів характеристичного випромінювання, а також Оже-електронів ( $e_3, e_4$ ).

Фотоелектрони, що утворюються, Оже-електрони, а також кванти характеристичного випромінювання, маючи велику енергію, можуть брати участь у вторинних актах взаємодії. При цьому вони самі вибивають електрони з атомів, створюючи вторинні електрони та кванти вторинного випромінювання. Такі процеси розміну енергії електронів і квантів будуть відбуватися доти, поки їх енергія не стане меншою енергії зв'язку електронів у атомі.



Співвідношення розглянутих ефектів залежить від атомного номера речовини  $Z$ . Імовірність процесів взаємодії з випускненням квантів характеристичного випромінювання збільшується зі збільшенням  $Z$ , а ймовірність оже-ефекту при цьому відповідно зменшується. Так, для легких елементів імовірність оже-переходів становить приблизно 95 %, а для елементів із  $Z > 70$  не перевищує 10 %.

Таким чином, унаслідок фотоелектричного поглинання енергія первинних рентгенівських квантів перетвориться в енергію первинних і вторинних електронів, а також у енергію квантів характеристичного випромінювання.

Зі зростанням енергії падаючих квантів усе більше починає проявлятися ефект некогерентного розсіювання (комптон-ефект). Комптон-ефект проявляється при взаємодії квантів із вільними або слабо зв'язаними електронами атомів речовини. Квант рентгенівського випромінювання з енергією  $h\nu_1$  унаслідок взаємодії з електроном частину своєї енергії  $E_e$  передає електрону (так званий електрон віддачі, або комптонівський електрон), а залишок енергії зберігається у вигляді розсіяного кванта з меншою енергією  $h\nu < h\nu_1$ . Із законів збереження енергії та імпульсу виходить, що енергія електрона віддачі  $E_e$  та енергія розсіяного кванта  $h\nu$  дорівнюють

$$E_e = h\nu_1 \frac{\alpha(1 - \cos \varphi)}{1 + \alpha(1 - \cos \varphi)} ; \quad h\nu = h\nu_1 \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos \varphi)} , \quad (4.6)$$

де  $\alpha = h\nu_1 / m_0 c^2$  – відношення енергії падаючого кванта до енергії маси спокою електрона;  $\varphi$  – кут між напрямками руху первинного та розсіяного квантів (кут розсіювання).

Як бачимо з виразів (4.6), розподіл енергії між електроном віддачі та розсіяним квантом залежить від кута розсіювання. При куті розсіювання  $\varphi = 0^\circ$ , коли напрямки руху розсіяного та первинного квантів збігаються, розсіяний квант бере всю енергію первинного і його енергія буде

максимальною ( $h\nu = h\nu_I$ ). У цьому граничному випадку розсіювання первинних квантів не відбувається й електрон віддачі не набуває енергії. При збільшенні кута розсіювання  $\varphi$  від 0 до  $180^\circ$  енергія розсіяного кванта зменшується, а енергія електрона віддачі зростає. При куті розсіювання  $\varphi = 180^\circ$  розсіяний квант має мінімальну енергію й рухається у напрямку, протилежному руху первинного кванта, а електрон віддачі набуває максимальної енергії.

Якщо енергія первинного кванта менша за енергію зв'язку електрона з атомним ядром (у разі сильного зв'язку електрона в атомі), то спостерігається когерентне розсіювання первинних квантів. При цьому поглинений атомом квант стимулює коливання орбітального електрона. Такий збуджений електрон не викидається з атома, а генерує вторинний квант, енергія якого дорівнює енергії первинного і який може рухатися під кутом до напрямку руху первинного кванта.

При комптонівському розсіюванні, як і при фотоефекті, відбуваються вторинні процеси взаємодії. Розсіяні кванти, маючи достатню енергію, здатні при взаємодії з електронами атомів зазнавати когерентного або комптонівського розсіювання. У свою чергу, електрони віддачі, також маючи достатню енергію, можуть вибивати електрони з атомів, створюючи вторинні електрони. Це відбуватиметься доти, поки енергії розсіяних квантів і електронів не стануть настільки малими, що вони не зможуть брати участь у процесах взаємодії.

Таким чином, при комптонівському розсіюванні, як і при фотоефекті, частина енергії первинних квантів перетворюється в енергію заряджених частинок (електронів віддачі), а частина залишається у вигляді енергії розсіяного рентгенівського випромінювання.

Обидва види розсіювання — когерентне і некогерентне — спостерігаються звичайно одночасно, однак один вид, як правило, переважає над іншим. Розсіювання високоенергетичного випромінювання в речовині з малим атомним номером є переважно некогерентним (компонівським), а

низькоенергетичного випромінювання в речовині з великим атомним номером – когерентним.

У разі, коли енергія квантів перевищує подвійну енергію спокою електрона (1,02 МеВ), крім фотоефекта та комптон-ефекту, спостерігається новий вид взаємодії квантів з речовиною поблизу атомного ядра: поглинання кванта з утворенням пари позитрон-електрон. Сумарна кінетична енергія обох частинок, відповідно до закону збереження енергії, дорівнює  $h\nu$ , але вона по-різному може бути розподілена між ними. Найбільш імовірний випадок рівності енергії. Створені позитрон і електрон розлітаються в таких напрямках, щоб геометрична сума їх кількостей руху плюс кількість руху частинки, у полі якої утворилася пара, дорівнювала кількості руху первинного кванта.

Кожен із розглянутих ефектів взаємодії випромінювання з речовиною проявляється в різних областях на площині  $Z - E$  (атомний номер поглинального атома – енергія квантів). Цей висновок ілюструє діаграма Еванса (рис. 4.2). Для цієї речовини у випадку квантів малих енергій основний вид взаємодії – фотоефект. Зі збільшенням енергії падаючих квантів переважну роль починає відігравати спочатку комптон-ефект, а потім ефект утворення позитрон-електронних пар. Роздільні графіки на рис. 4.2 відповідають рівності внеску розглянутих ефектів у ослаблення випромінювання, що проходить через речовину.

У робочому діапазоні енергій рентгенівських апаратів (до 450 кеВ) основний внесок в ослаблення випромінювання роблять фотоефект і комптон-ефект, а діапазони енергій, у яких переважає перший або другий вид взаємодії, залежать від атомного номера речовини  $Z$ . Так, наприклад, для алюмінію ( $Z = 13$ ) область домінування фотоефекта простирається до 50 кеВ, для заліза ( $Z = 26$ ) – до 100 кеВ, для міді ( $Z = 29$ ) – до 150 кеВ, а для свинцю ( $Z = 82$ ) – до 500 кеВ.

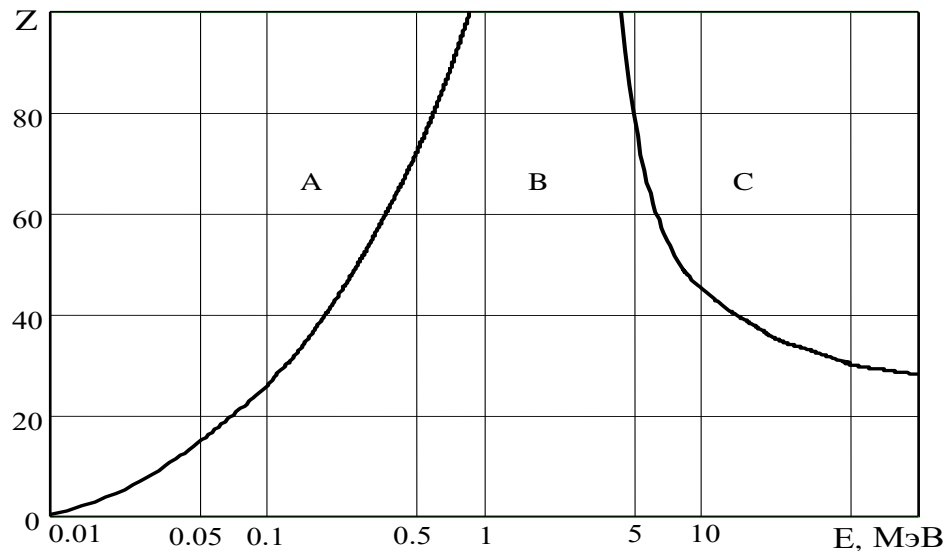


Рисунок 4.2 – Діаграма Еванса: А – область переваги фотоефекта; В – область переваги комптон-ефекту; С – область переваги ефекту утворення позитрон-електронних пар

*Потік електронів* ( $\beta$ -випромінювання) проникає в речовину на значно меншу відстань, ніж рентгенівське та  $\gamma$ -випромінювання, і швидко поглинається речовиною. Взаємодія  $\gamma$ -випромінювання з речовиною відбувається шляхом пружного та непружного розсіювань, гальмування електронів у електричному полі атомів. Пружне розсіювання спостерігається, коли електрони взаємодіють із атомами або з електронами їх оболонок, і полягає в зміні напрямку руху електрона без зміни загальної енергії зіштовхнутих частинок. Відхилення електронів від початкового напрямку руху можливе на будь-який кут, але з більшою ймовірністю електрони відхиляються на малі кути. Пружне розсіювання тим більше, чим більший атомний номер речовини. При непружному розсіюванні, що відбувається здебільшого при взаємодії  $\beta$ -частинок із орбітальними електронами атома, частина енергії  $\beta$ -частинок передається орбітальному електрону, що збуджується та іноді залишає атом. Унаслідок непружного розсіювання відбувається іонізація речовини та випускнення збудженими атомами характеристичного випромінювання.

*Потік  $\alpha$ -частинок*, проходячи через шар речовини, так само як потік  $\beta$ -частинок, досить швидко загасає. У речовині  $\alpha$ -частинки зазнають пружних і непружних зіткнень, унаслідок чого змінюється напрямок руху, зменшується інтенсивність і випромінювання повністю загасає. Цей вид випромінювання в неруйнівному контролі застосовується рідко.

*Нейтрони* не мають електричного заряду, тому їх взаємодія відбувається з атомними ядрами. Ймовірність їх зустрічі залежить від хімічного складу та структури речовини, а також від енергії нейтрона набагато більше, ніж для інших видів випромінювань. Тому цей вид випромінювання не знайшов широкого застосування в мікродіагностиці матеріалів.

#### **4.4 Джерела іонізуючого випромінювання**

*Радіоізотопні джерела випромінювання.* Основою радіоізотопних джерел є штучні ізотопи, що отримують шляхом опромінення нерадіоактивних речовин у нейтронних потоках ядерних реакторів або на циклотронах, а також шляхом розділення продуктів ділення ядерного реактора. Радіоактивний ізотоп є випромінювальною (активною) частиною джерела, що визначає його активність і спектр випромінювання.

Радіоізотопні джерела мають дискретний спектр випромінювання, що складається звичайно з потоку часток і  $\gamma$ -квантів із різною енергією. Вони можуть створювати всі види іонізуючих випромінювань:  $\gamma$ -випромінювання,  $\beta$ -випромінювання,  $\alpha$ -випромінювання, гальмівне та нейтронне випромінювання.

Радіоізотопні джерела створюють неперервне випромінювання, інтенсивність якого з часом зменшується, тому такі джерела зберігаються в захисних контейнерах, а поза межами робочого часу поміщаються в спеціальні сховища. Під час використання важливо знати дату виготовлення джерела та враховувати зниження інтенсивності випромінювання. Цю особливість враховують під час організації неруйнівного контролю та

створення апаратури шляхом введення необхідного запасу чутливості та додаткових регулювань. Побудова одного з таких джерел схематично наведена на рис. 4.3.

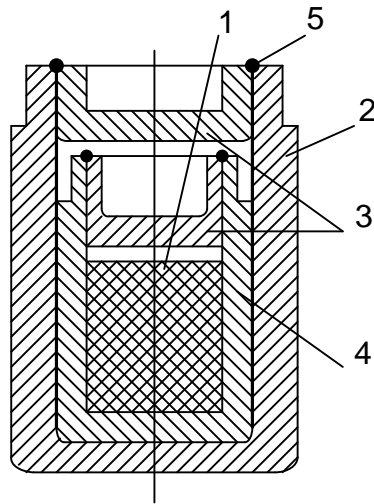


Рисунок 4.3 – Радіоізотопне джерело випромінювання: 1 – радіоактивна речовина; 2 – захисний корпус; 3 – кришка; 4 – внутрішня оболонка ампули; 5 – герметик

*Прискорювачі заряджених частинок* (як правило, електронів) безпосередньо створюють потік частинок, що рухаються з певною енергією, яка залежить від його режиму роботи. З їх допомогою при достатній швидкості руху електронів можна отримати різні види корпускулярних випромінювань та  $\gamma$ -випромінювання шляхом бомбардування спеціально підібраних мішеней. Так, використовуючи мішені з дейтерію, тритію, берилію, урану або вісмуту, під час бомбардування їх електронами можна отримати нейтронне випромінювання, а мішені з вольфраму або молібдену створюють гальмівне  $\gamma$ -випромінювання. Гальмівне випромінювання, отримане за допомогою опромінення мішені від прискорювачів, має моноенергетичний спектр, подібний до випромінювання рентгенівської трубки. Розмір фокусної плями вторинного гальмівного випромінювання прискорювачів становить частки квадратного міліметра.

*Бетатрон* є потужним джерелом електронів, побудованим на базі циклічного індукційного прискорювача (рис. 4.4 – поперечний розріз).

Основними частинами бетатрона є потужний електромагніт 1, що має осьову симетрію. Електрони в бетатроні рухаються в його магнітному полі, що наростає в часі, під дією індукованого вихрового прискорювального електричного поля, силові лінії якого – коаксіальні кола. Обмотки електромагніта 1 живляться від мережі змінного струму.

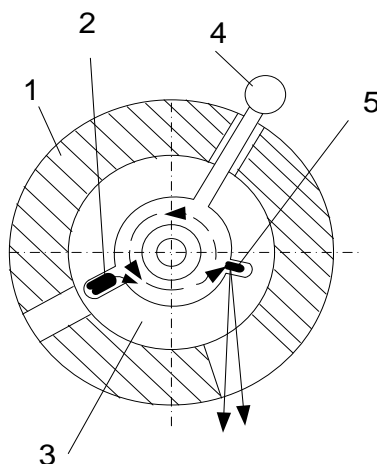


Рисунок 4.4 – Схема конструкції бетатрона: 1 – електромагніт; 2 – інжектор; 3 – вакуумна камера; 4 – вакуумний насос; 5 – мішень

На початку періоду інжектор 2, виконаний у вигляді високовольтної електронної гармати (катод, прискорювальний електрод і анод), створює в порожнині вакуумної камери 3 потік електронів, що рухається по дотичній до центрального кола камери. За чверть періоду живлячої напруги (близько 5 мс при частоті 50 Гц) електрони роблять кілька мільйонів обертів і набувають необхідної енергії. Наприкінці чверті періоду, коли відбувається прискорення, на обмотки електромагніта (не показані на рис. 4.4) подається імпульс струму, що змушує електрони зрушитися з орбіти, і вони потрапляють у потрібну область поза камерою на мішень 5, встановлену для одержання гальмівного випромінювання. Змінюючи момент подачі імпульсу струму в обмотках, можна регулювати енергію електронів, що потрапляють на мішень.

*Лінійні прискорювачі* відрізняються тим, що прискорені електрони рухаються по траєкторіях, близьких до прямих ліній. Порівняно з іншими

джерелами гальмівного випромінювання вони дають більшу інтенсивність випромінювання.

Лінійні прискорювачі можуть використовувати різні принципи прискорення: електростатичний, каскадний, імпульсний, індукційний і резонансний. Найбільше застосування в промисловості отримали лінійні резонансні прискорювачі (рис. 4.5), побудовані на використанні електромагнітної біжучої хвилі, створеної магнетронним НВЧ-генератором у діафрагмованому хвилеводі.

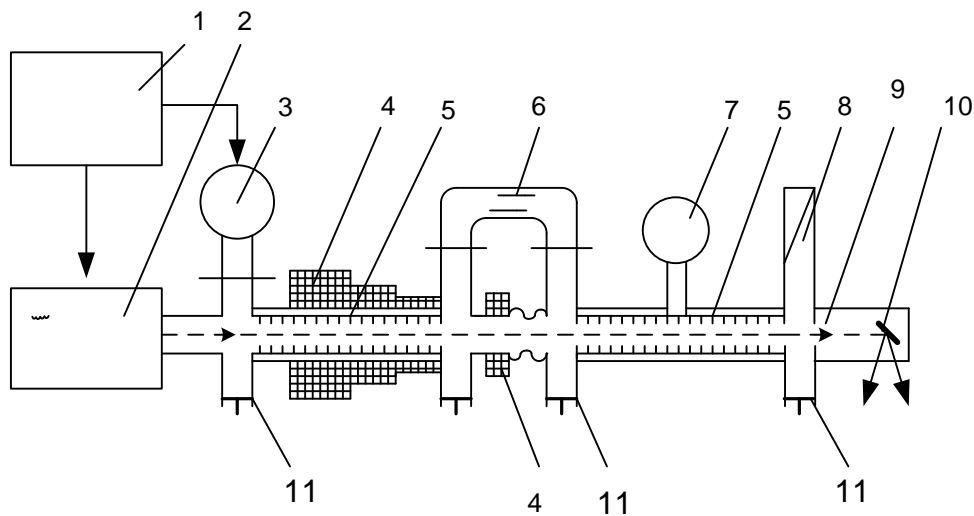


Рисунок 4.5 – Схема конструкції лінійного прискорювача із узгоджувальною системою: 1– блок живлення; 2– інжектор; 3– НВЧ-генератор; 4– фокусувальні котушки; 5 – хвилевідні уповільнювальні структури; 6– підстроювання фази; 7– вакуумний насос; 8– узгоджене навантаження; 9– камера випромінювача; 10– мішень; 11 – настроювальні поршні

У резонансних лінійних прискорювачах використовують котушки, які фокусують електрони магнітним полем, та уповільнювальні хвилевідні структури. Лінійні прискорювачі мають хороші перспективи застосування в неруйнівному контролі, особливо при контролі виробів із чорних металів великої товщини.



*Мікротрон* є циклічним прискорювачем із постійним і однорідним магнітним полем і сталою частотою прискорювального НВЧ-поля, що обирають таким чином, щоб електрони під час руху по колових орбітах потрапляють в резонатор у такі моменти, коли поле між його пластинами є прискорювальним. Періодичне прискорення електронів забезпечується в тому разі, якщо час обертання електрона відрізняється від часу обертання на попередній або наступній орбіті на один період НВЧ-коливань. При досягненні орбіти найбільшого діаметра електрони виводяться з мікротрона на мішені.

Крім відзначених вище пристроїв, знаходять застосування й інші види прискорювачів: прискорювачі прямої дії, у яких прискорення відбувається під дією постійного електричного поля, і прискорювачі більш важких заряджених частинок ( $\alpha$ -частинок, протонів, дейтонів), енергію яких, крім безпосереднього використання, можна перетворити в інші види іонізуючих випромінювань (гальмівне випромінювання, потік нейтронів та ін.).

*Джерела рентгенівського випромінювання.* Найбільшого поширення в радіаційному неруйнівному контролі отримали рентгенівські апарати [5, 8, 25]. Рентгенівським апаратом називають сукупність технічних засобів, призначених для одержання рентгенівського випромінювання. Рентгенівські апарати можна класифікувати:

- за конструктивним виконанням: кабельні та моноблокові;
- за форми анодної напруги рентгенівської трубки: неперервної дії та імпульсні.

Структурні схеми кабельного та моноблокового рентгенівських апаратів неперервної дії наведені на рис 4.6.

Рентгенівський випромінювач кабельного апарата містить рентгенівську трубку, що знаходиться у захисному кожухі. Високовольтний генератор кабельного апарата виконаний у вигляді окремого блока та складається з високовольтного трансформатора, трансформатора розжарення рентгенівської трубки й випрямляча. Пульт керування зазвичай містить

регулятори анодної напруги та струму рентгенівської трубки, вимірювальні прилади, сигнальна система та систему керування. Апарати кабельного типу випускають із примусовим водяним охолодженням на анодні напруги до 450 кВ, анодні струми до 20 мА та призначені для роботи в цехових і лабораторних умовах.

У моноблокових рентгенівських апаратах рентгенівська трубка та високовольтний генератор об'єднані в єдиний рентгенівський моноблок, залитий маслом або заповнений газом (рис. 4.6 б). Апарати такого типу випускають як у стаціонарних виконаннях, так й у переносних для роботи в польових умовах. Стаціонарні моноблокові апарати випускають із водяним охолодженням на анодні напруги до 300 кВ та анодні струми до 10 мА.

Переносні моноблокові апарати відрізняються малими габаритами й вагою. Важливими характеристиками таких апаратів є потужність і час безперервної роботи, що залежать від їх конструкції та системи охолодження. Переносні моноблокові апарати випускають переважно на анодні напруги до 200 кВ і анодні струми до 5 мА.

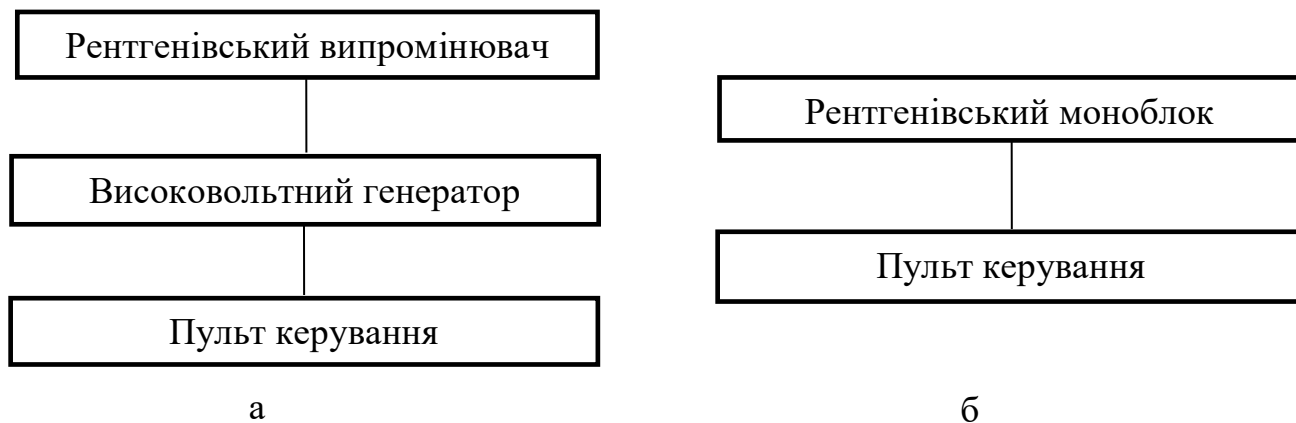


Рисунок 4.6 – Структурні схеми кабельного (а) і моноблокового (б) рентгенівських апаратів

До переваг рентгенівських апаратів неперервної дії можна віднести можливість плавного регулювання анодної напруги та анодного струму рентгенівської трубки, високі потужність і часова стабільність

випромінювання, що забезпечує високоякісний рентгенівський контроль у широкому діапазоні товщин об'єктів із різних матеріалів.

Імпульсні рентгенівські апарати характеризуються малими габаритами, вагою та низькою вартістю, що забезпечило їх широке застосування в радіаційному неруйнівному контролі. Конструктивно такі апарати виконуються у вигляді двох блоків: пульта керування та рентгенівського випромінювача. На відміну від апаратів неперервної дії, у яких застосовуються рентгенівські трубки з розжарювальним катодом (термокатодом), основою імпульсних рентгенівських апаратів є рентгенівські трубки з холодним катодом і вибуховою електронною емісією.

На рис. 4.7 наведена спрощена принципова схема, що пояснює принцип роботи імпульсного рентгенівського апарата. На початку робочого циклу накопичувальний конденсатор С1 заряджається від джерела живлення постійної напруги (на схемі не показаний). При замиканні ключа К попередньо заряджений конденсатор С1 розряджається через первинну обмотку трансформатора Тр. При цьому у його вторинній обмотці виникає імпульс високої напруги тривалістю порядку  $10^{-6}$  с, що заряджає вихідну ємність С2 до напруги 100–300 кВ залежно від типу апарата. Розрядник-загострювач Р перетворює енергію, накопичену в конденсаторі С2, в імпульс високої напруги тривалістю  $10^{-8}$  с, що прикладається до електродів рентгенівської трубки РТ. Під дією імпульсу високої напруги короткої тривалості в області вольфрамового катода за рахунок вибухової емісії утворюється хмара плазми, що є джерелом електронів. Прискорені електрони досягають анода та генерується імпульс рентгенівського випромінювання. Максимальна анодна напруга в імпульсі є фіксованою і дорівнює напрузі спрацьовування розрядника-загострювача. Далі робочий цикл повторюється. Таким чином, такі апарати генерують періодичні імпульси рентгенівського випромінювання тривалістю 10–20 нс із частотою повторення 5–20 Гц.

Конструктивно імпульсний трансформатор, розрядник-загострювач і рентгенівська трубка знаходяться в металевому контейнері, заповненому

трансформаторним маслом і розташованому рентгенівському випромінювачі.

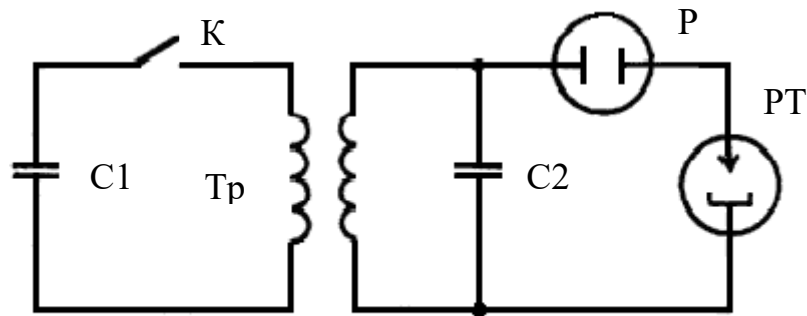


Рисунок 4.7 – Принципова схема, що пояснює принцип роботи імпульсного рентгенівського апарата: C1 – накопичувальний конденсатор; K – ключ (первинний комутатор); Tr – імпульсний трансформатор; C2 – розрядна ємність; P –розрядник-загострювач; PT – рентгенівська трубка

Області застосування імпульсних рентгенівських апаратів – рентгенівський неруйнівний контроль об'єктів у польових умовах та важкодоступних місцях (газо- і нафтопроводи, корпуси судів, мостових споруджень, контроль багажу тощо). Імпульсні апарати застосовуються також для дослідження швидкоплинних процесів у непрозорих об'єктах (процеси електричного пробоя діелектриків і динамічного ущільнення матеріалів, особливості поширення ударних хвиль у різних середовищах, вибухові та детонаційні явища тощо).

До недоліків імпульсних рентгенівських апаратів можна віднести неможливість регулювання анодної напруги та анодного струму рентгенівської трубки, малу середню потужність випромінювання, обмежений час безперервної роботи, малий термін служби імпульсної рентгенівської трубки (100–150 годин).

Невід'ємною частиною рентгенівських апаратів є рентгенівська трубка – високовольтний електровакуумний прилад, що має катод, анод і

фокусувальні елементи та призначений для генерації рентгенівського випромінювання.

Рентгенівські трубки класифікують:

- за принципом роботи: неперервної дії та імпульсні;
- за типом охолодження: з водяним, масляним і повітряним охолодженням;
- за способом фокусування електронного пучка: з електростатичним, магнітним і електромагнітним фокусуванням;
- за розміром фокусної плями: макрофокусні (розмір фокусної плями більше 1 мм), гострофокусні (0,1–1 мм) і мікрофокусні (менше 0,1 мм).

Рентгенівську трубку виготовляють у вигляді замкненого скляного або металокерамічного балона з вакуумним розрядженням  $10^{-5}$ – $10^{-7}$  мм рт. ст. На рис. 4.8 показана конструкція найбільш поширеної двохелектродної рентгенівської трубки неперервної дії з термокатодом і нерухомим анодом. У колбі 8 розміщені катод 2 та анод 7, які є двома основними електродами трубки. Катод 2 є джерелом потоку електронів, що утворюється при його нагріванні до температури 2370–2770 К ниткою розжарення 1 за рахунок термоелектронної емісії. Кількість електронів, що вилітають, визначає струм анода і залежить від температури катода, що задається величиною струму нитки розжарення.

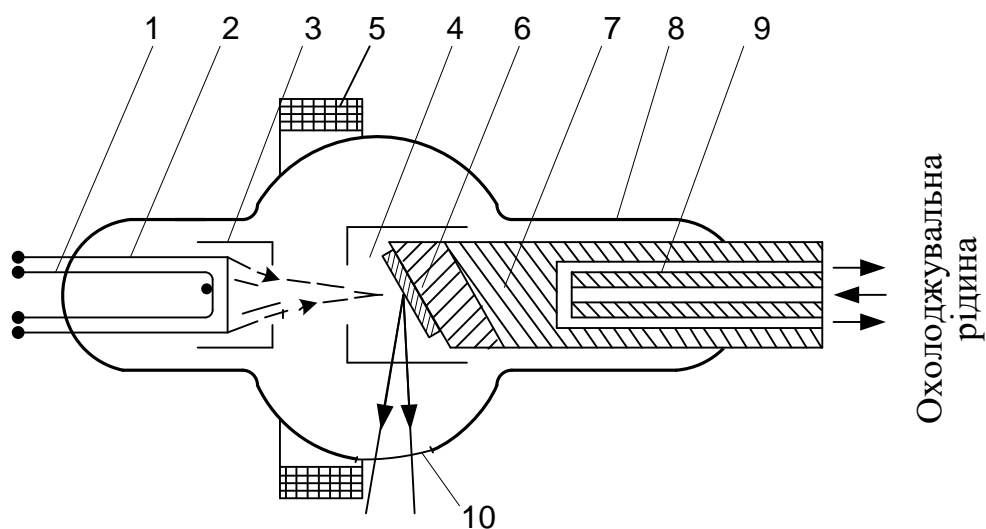


Рисунок 4.8 – Схема конструкції рентгенівської трубки:

1 – нитка розжарення; 2 – катод; 3, 4 – фокусувальні електроди; 5 – фокусувальні котушки; 6 – мішень; 7 – анод; 8 – колба; 9 – охолоджувальні трубки; 10 – вихідне вікно

Фокусувальні електроди 3 і 4 створюють електричні поля спеціальної форми, що збирають електрони у вузький пучок. Із цією самою метою використовують додаткове фокусування магнітним полем коротких котушок 5, по яких пропускають постійний електричний струм. Анод 7 виготовлений з мідного циліндра із привареною до його торця мішенню 6 із вольфраму, графіту або іншого тугоплавкого матеріалу. Анод 7 звичайно має систему трубок 9, по яких циркулює охолоджувальна рідина для відведення тепла, що виділяється під час влучення електронів у анод. Між анодом і катодом прикладена висока постійна напруга величиною від десятків до кількох сотень кіловольтів. За рахунок великого позитивного потенціалу на аноді електрони прискорюються до великих швидкостей і при ударі об мішень 6 за рахунок гальмування створюють рентгенівське випромінювання, що виходить через вікно 10.

На рис. 4.9 наведена конструкція імпульсної рентгенівської трубки із прострільним анодом на анодну напругу 150 кВ. Катод 3, виконаний із вольфрамової трубки діаметром 2 мм із товщиною стінки 0,2 мм, установлений на грибоподібний електрод 4. Цей електрод захищає скляний конічний ізолятор 6 від конденсації парів металу. До металевого циліндричного корпусу 5 припаяне вихідне вікно 1 із ковара товщиною 0,2 мм. Вивід 7, що має назву штенгеля, призначений для вакуумного відкачування трубки.

У цій трубці прострільний вольфрамовий анод 2 приварений безпосередньо до вихідного вікна 1. Електрони із плазми, що утворюється на кінці циліндричного катода 3, бомбардують плоский заземлений анод 2 з одного боку. При цьому фотони рентгенівського випромінювання, що генеруються в аноді 2, виходять із анода з іншого боку. Тому такий анод

називають прострільним. Далі імпульсне рентгенівське випромінювання через вікно 1 надходить на вихід трубки.

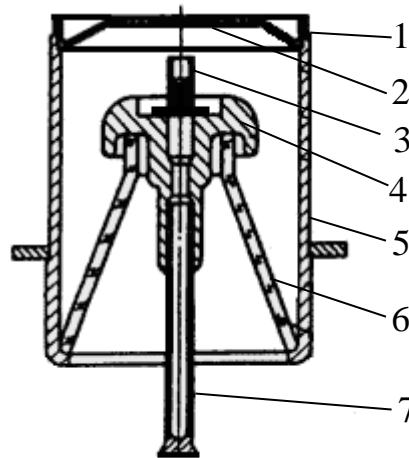


Рисунок 4.9 –Схема конструкції імпульсної рентгенівської трубки із прострільним анодом на напругу 150 кВ: 1 – вихідне вікно; 2 – анод; 3 – катод; 4 – електрод; 5 – корпус; 6 – скляний ізолятор; 7 – вивід

#### 4.5. Детектори іонізуючого випромінювання

*Детектором* іонізуючого випромінювання називають чутливий елемент, призначений для перетворення енергії іонізуючого випромінювання в інший вид енергії, зручний для реєстрації та (або) вимірювання параметрів іонізуючого випромінювання [8, 25].

Іонізуюче випромінювання можна виявити лише за взаємодією його із середовищем, що призводить до утворення іонів різних знаків. Явище іонізації використовується в більшості детекторів іонізуючих випромінювань. У деяких детекторах, наприклад сцинтиляційних, використовуються ефекти, що супроводжують іонізацію.

Детектори, що застосовуються в апаратурі радіаційного контролю та дозиметрії, класифікують у такий спосіб:

- іонізаційні;
- напівпровідникові;
- радіюлюмінесцентні;
- радіографічні.

*Іонізаційні камери.* В іонізаційній камері до об'єму газу між двома електродами прикладається різниця потенціалів. Залежно від форми електродів камери підрозділяють на циліндричні, плоскі та сферичні.

На рис. 4.10 наведена схема циліндричної іонізаційної камери, у якій газом наповнений циліндричний катод 1, через який проходить аксіально розміщений стрижневий анод 2. За наявності поля іони та електрони 4, що утворилися під дією випромінювання 3, рухаються до відповідних електродів і в зовнішньому ланцюзі з'являється струм, величина якого визначається різницею потенціалів на електродах. Залежність іонізаційного струму  $I$  від напруги  $U$  на електродах камери показана на рис. 4.11. При збільшенні напруги від нуля до  $U_1$  іонізаційний струм лінійно зростає, тому що зі збільшенням напруженості поля збільшується швидкість іонів і підвищується ймовірність досягнення ними відповідного електрода без рекомбінації. У діапазоні напруг  $U_1-U_2$  всі іони, що утворилися, досягають електродів, тому збільшення напруги не викликає збільшення струму. Цю ділянку називають областю насичення.

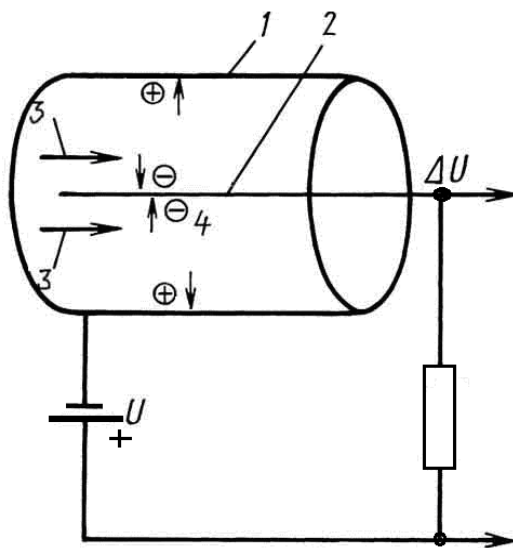


Рисунок 4.10 – Схема циліндричної іонізаційної камери:

1 – катод; 2 – анод; 3 – іонізуюче випромінювання; 4 – іони та електрони

При збільшенні напруги вище  $U_2$  (рис. 4.11) швидкість іонів стає достатньою для іонізації молекул газу внаслідок зіткнень (ударної іонізації),



внаслідок чого з'являються нові носії зарядів. У діапазоні напруг  $U_2-U_3$  спостерігається спочатку область пропорційності, а потім область обмеженої пропорційності, де лінійна залежність порушується.

Нарешті, у діапазоні напруг  $U_3-U_4$  (область Гейгера) у газі, що заповнює камеру, виникає електронна лавина, що збуджує атоми газу. Збуджені атоми випускають кванти ультрафіолетового випромінювання. Ці кванти разом із позитивними іонами вибивають із катода вільні електрони, які, прискорюючись електричним полем, сприяють підтримці в газі самостійного розряду.

Іонізаційні камери працюють в області насичення ( $U_1-U_2$ ). Напруга насичення залежить від форми електродів і відстані між ними. Напруга на електродах іонізаційних камер звичайно становить 100–220 В. Іонізаційний струм, що виникає в камері, вимірюють під час його проходження через зовнішній ланцюг. Цей струм дуже малий, що вимагає застосування підсилювальних пристроїв.

*Газові лічильники.* Газовий лічильник – це детектор, за конструкцією аналогічний іонізаційній камері. Призначений для реєстрації окремих іонізуювальних частинок. На відміну від іонізаційних камер у газових лічильниках для посилення іонізаційного струму використовується газовий розряд.

Залежно від характеру газового розряду, що використовується, такі лічильники можна розділити на два типи:

- пропорційні лічильники (із несамостійним розрядом);
- лічильники Гейгера (із самостійним розрядом).

*Пропорційні лічильники* працюють в умовах газового посилення в області пропорційності (діапазон напруг  $U_2-U_3$  на рис. 4.11), де значення

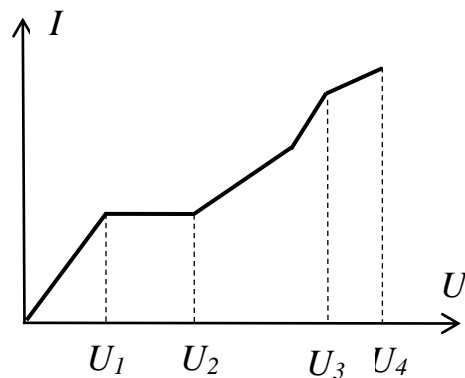


Рисунок 4.11 – Залежність іонізаційного струму від напруги на електродах іонізаційної камери

імпульсу струму залежить від первинної іонізації, тому за допомогою цих лічильників можна визначати вид та енергію іонізуючих частинок.

Коефіцієнт газового посилення пропорційного лічильника може досягати  $10^6$ . Щоб коефіцієнт газового посилення якнайменше залежав від місця виникнення первинної іонізації, катод лічильника виготовляють у вигляді циліндра, а як анод використовують тонку вольфрамову нитку, натягнуту по осі цього циліндра (конструкція, аналогічна циліндричній іонізаційній камері). На електроди пропорційного лічильника подається напруга більше 300 В.

Лічильник Гейгера працює при напругах, що перевищують  $U_3$  (рис. 4.11). Струм вихідного імпульсу такого лічильника не залежить від значень початкової іонізації. Всі імпульси при заданій напрузі незалежно від роду іонізаційних частинок та їх енергій мають однакове значення струму. Лічильники Гейгера найбільш широко застосовують для дозиметричного контролю.

*Напівпровідникові детектори.* До напівпровідникових детекторів відносять власне напівпровідникові детектори (лічильники) та електрорадіографічні пластини.

Напівпровідники під дією іонізуючого випромінювання змінюють свої властивості та можуть використовуватися як детектори випромінювання. У радіаційному неруйнівному контролі та дозиметрії застосовуються такі типи напівпровідникових детекторів: дифузійні детектори з  $p$ - $n$ -переходом, поверхнево-бар'єрні та дифузійно-дрейфові детектори.

Схема дифузійного детектора з  $p$ - $n$ -переходом наведена на рис. 4.12. У процесі виготовлення такого детектора за допомогою дифузійної технології безпосередньо під його поверхнею формують  $p$ - $n$ -перехід. При прикладанні до детектора зовнішньої напруги з полярністю, що зміщує  $p$ - $n$ -перехід у зворотному напрямку, потенційний бар'єр на переході зростає та виникає збіднена носіями заряду зона 1 (рис. 4.12). Ця збіднена область є чутливим об'ємом детектора та аналогічна чутливому об'єму газу в іонізаційному

детекторі. Заряджені частинки, потрапляючи в збіднену носіями заряду область, генерують електронно-діркові пари. Оскільки в чутливому об'ємі напівпровідникового детектора існує електричне поле, при взаємодії іонізуючою частинкою з ним виникає імпульс струму, пропорційний енергії, яка віддана частинкою чутливому об'єму детектора.

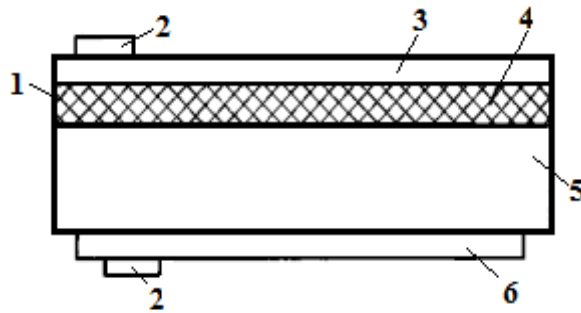


Рисунок 4.12 – Схема дифузійного детектора з  $p$ - $n$ -переходом:

1 – збіднена область; 2 – електричні контакти; 3 – вхід детектора; 4 – область  $n$ -типу; 5 – кремній  $p$ -типу; 6 – металевий електрод

Принцип дії поверхнево-бар'єрних і дифузійно-дрейфових детекторів той самий, що й у детектора з  $p$ - $n$ -переходом: виникає збіднена зона, у якій існує електричне поле. Спосіб створення збідненої зони, так само як і її розміри та місце розташування в кристалі, варіюється від одного типу детектора до іншого. Поверхнево-бар'єрні детектори порівняно з детекторами з  $p$ - $n$ -переходом мають кращу роздільну здатність за енергією, однак в останніх більш широка збіднена область, що дозволяє їм детектувати частинки з більш високою енергією.

Напівпровідникові детектори у поєднанні з підсилювачами дозволяють вимірювати густини потоку важких частинок, електронів і фотонного випромінювання. Поверхнево-бар'єрні кремнієві детектори застосовують для реєстрації швидких і повільних нейтронів. Амплітудна роздільна здатність напівпровідникових детекторів приблизно в п'ять разів краща, ніж газових пропорційних лічильників. Крім того, вони мають такі переваги, як висока

швидкість рахунку, лінійність сигналу в широкому діапазоні енергій, можливість селективної реєстрації частинок, невеликі розміри та ін.

*Електрорадіографічні пластини* застосовують як детектор іонізуючого випромінювання при електрорадіографічному методі радіаційного контролю. Під час проведення електрорадіографічного контролю використовують напівпровідникові селенові пластини, що складаються з металеві алюмінієвої підкладки, на яку у вакуумних умовах шляхом термічного випару нанесений шар фотонапівпровідника – аморфного селену. Товщина селенового шару становить 100–500 мкм.

Процес одержання електрорентгенограми складається з таких етапів. Для надання пластині з напівпровідниковим шаром фоточутливості на поверхню шару аморфного селену наносять рівномірний за площею електричний заряд. У процесі нанесення заряду висока напруга (5–7 кВ) підводиться до електродів, що розміщені над пластиною. У повітряному проміжку між електродами і шаром селену виникає коронний розряд. Іони повітря, що утворилися в процесі розряду, осідають на селеновому шарі. Залежно від полярності напруги, що подається на електроди, на поверхню селенового шару може бути нанесений або позитивний, або негативний потенціал відносно підкладки. Після зарядки пластину закривають світлонепроникним кожухом і вона готова до експонування.

Експонування зарядженої пластини здійснюється фотонним випромінюванням, що пройшло через контрольований об'єкт. Взаємодіючи із селеновим шаром, випромінювання генерує вільні носії заряду (електронно-діркові пари) і зменшує його електричний опір. Унаслідок зменшення опору нейтралізується заряд, нанесений на шар. Причому нейтралізація заряду в першому наближенні пропорційна інтенсивності випромінювання. Унаслідок цього на поверхні фотонапівпровідникового шару утворюється приховане електростатичне зображення, що проявляється при запиленні поверхні селенового шару дрібнодисперсним зарядженим порошком –

електрографічним проявником. Інтенсивність осідання порошку на пластині також пропорційна значенню залишкового заряду.

Далі проявлене видиме порошкове зображення переносять на інший носій (як правило, папір), який використовують для аналізу та зберігання електрорентгенограми.

*Радіолюмінесцентні детектори.* Принцип дії цих детекторів базується на явищі радіолюмінесценції – випромінюванні деякими речовинами світла під впливом іонізуючого випромінювання [25].

Явище радіолюмінесценції можна пояснити в такий спосіб. При взаємодії випромінювання з речовиною генеровані електрони передають речовині свою кінетичну енергію шляхом іонізації та збудження атомів речовини. Іонізація пов'язана з видаленням електрона з атома, а збудження – з підвищенням енергетичного стану електрона в атомі. Повернення збуджених електронів у нормальний низькоенергетичний стан (релаксація) відбувається досить швидко і супроводжується випускненням речовиною фотонів видимого світла.

Ці світлові фотони, що випускаються, проявляються у вигляді спалахів, тобто речовини сцинтилюють, і тому називаються сцинтиляторами, або люмінофорами.

Є різні сцинтилятори, що дозволяють детектувати альфа- і бета-частинки, фотонне та нейтронне випромінювання. Низка сцинтиляторів, які широко застосовуються в системах радіаційного контролю, наведена у табл. 4.1.

Сцинтиляційні матеріали виготовляють у газоподібній, рідкій і твердій формах. Як сцинтилятори широко застосовують органічні рідини та тверді речовини, а також неорганічні гази та тверді речовини. Тверді органічні сцинтилятори випускають у вигляді кристалів, пластинок і гелів. Тверді сцинтилятори мають більш високу густину, ніж гази, і перевершують за ефективністю детектування газові іонізаційні камери на кілька порядків.

Таблиця 4.1 – Сцинтилятори для систем радіаційного контролю

Назва	Хімічна формула	Тип детектованих частинок
Йодид натрію	NaI (Tl)	Фотони
Йодид цезію	CsI (Tl)	Фотони
Йодид літію	LiI (Eu)	Фотони, нейтрони
Сульфід цинку	ZnS(Ag)	Альфа-частинки
Германат вісмуту	BiGe <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	Фотони
Вольфрамат кадмію	CdWO <sub>4</sub>	Фотони
Оксисульфід гадолінію	Gd <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S(Tb)	Фотони

Як показали дослідження, люмінесценція багатьох твердих тіл сильно залежить від наявності в них незначних домішок, що визначають як колір світіння, так і здатність до люмінесценції. Ці домішки називають активаторами, а люмінофори, що їх містять, розглядають як тверді розчини активатора в основній речовині – основі люмінофора. Акт випромінювання світла відбувається в мікроскопічних утвореннях, пов'язаних з атомами активатора. Такі утворення отримали найменування центрів світіння. У табл. 4.1 для сцинтиляторів у дужках хімічних формул зазначені елементи, що використовуються як активатори.

Для ефективного застосування в апаратурі радіаційного контролю та дозиметрії сцинтилятори повинні відповідати низці вимог: вони повинні мати високу щільність і містити атоми хімічних елементів із високим атомним номером, мати високу ефективність перетворення енергії іонізуючого випромінювання у світлову енергію та високу просторову роздільну здатність, мати відпрацьовану технологію виготовлення.

Для вимірювання параметрів іонізуючих випромінювань сцинтилятори сполучають із перетворювачами «світло–сигнал»: фотоелектронними помножувачами, фотодіодами або іншими фотоприймачами. При виборі пари сцинтилятор – фотоприймач для досягнення високої ефективності

детектування необхідно враховувати відповідність спектральної характеристики випромінювання сцинтилятора спектральній характеристиці чутливості фотоприймача. Мірою такої взаємної відповідності є коефіцієнт спектральної відповідності  $K_c$ :

$$K_c = \frac{\int_0^{\infty} I(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} I(\lambda) d\lambda}, \quad (4.7)$$

де  $I(\lambda)$  – нормована спектральна характеристика випромінювання сцинтилятора;  $S(\lambda)$  – нормована спектральна характеристика чутливості фотоприймача.

*Детектори «сцинтилятор – ФЕП».* Фотоелектронний помножувач (ФЕП) – це електровакуумний прилад, що складається з фоточутливого шару (фотокатода) і системи спеціальних електродів, що називаються динодами. Фотокатод за рахунок зовнішнього фотоефекта перетворює світлові фотони в потік фотоелектронів, що прискорюються електростатичним полем, після чого їх кількість множитья на динодах. Кількість динодів ФЕП звичайно становить від 9 до 13. Робота динода базується на явищі вторинної електронної емісії, коли первинний електрон, потрапляючи на динод, вибиває кілька електронів (які називаються вторинними). Наприкінці динодної системи знаходиться анод, крізь який проходить вихідний струм ФЕП.

Пари сцинтилятор – ФЕП підбирають із урахуванням їх взаємної спектральної відповідності, що тим краще, ніж ближче до одиниці значення коефіцієнта спектральної відповідності, яке розраховується за формулою (4.7). Так, наприклад, комбінація сцинтилятора Cs(Tl) і ФЕП із багатолужним фотокатодом, для якої  $K_c = 0,83$ , є більш доцільною, ніж комбінація Cs(Tl) і ФЕП із SbCs-фотокатодом, для якої  $K_c = 0,48$ .

За рахунок високого коефіцієнта підсилення ФЕП ( $10^6$ – $10^8$ ) такі детектори перевищують за ефективністю детектування іонізаційні камери та напівпровідникові детектори.

Детекторам «сцинтилятор – ФЕП» властива також низка недоліків. Це чутливість до магнітних полів та до зміни температури, порівняно невелика ( $10^2$ – $10^3$ ) лінійна ділянка динамічного діапазону, необхідність високовольтного живлення ФЕП і жорсткі вимоги до його стабільності, відносно великі габарити.

*Детектори «сцинтилятор – фотодіод».* Детектори «сцинтилятор – фотодіод» мають практично всі переваги детекторів «сцинтилятор – ФЕП», зокрема реалізацією в них ефекту внутрішнього підсилення (при застосуванні як фотоприймача лавинного фотодіода).

Схема детектора «сцинтилятор – фотодіод» наведена на рис. 4.13. Сцинтилятор 2 перетворює іонізуюче випромінювання 1 у світлові фотони, що потрапляють на  $p$ – $n$ -перехід 4 фотодіода. Фотодіод перетворює світловий потік в електричний сигнал, який після підсилення в підсилювачі 3 надходить на вихід детектора. Як фотоприймач у таких детекторах звичайно застосовують кремнієві або арсенід-галієві фотодіоди.

Детектори «сцинтилятор – фотодіод» мають низку переваг перед детекторами «сцинтилятор – ФЕП»: низька напруга живлення; невелика споживана потужність; малі габарити; мала чутливість до механічних, температурних і магнітних впливів. Крім того, ефективність перетворення енергії випромінювання такими детекторами приблизно на порядок вища, ніж детекторами «сцинтилятор – ФЕП».

Нині детектори «сцинтилятор – фотодіод» знайшли широке застосування в дозиметрії іонізуючих випромінювань; у радіаційних системах неруйнівного контролю з лінійним і матричним розміщенням десятків, сотень і тисяч таких детекторів, у промислових і медичних томографах [8].



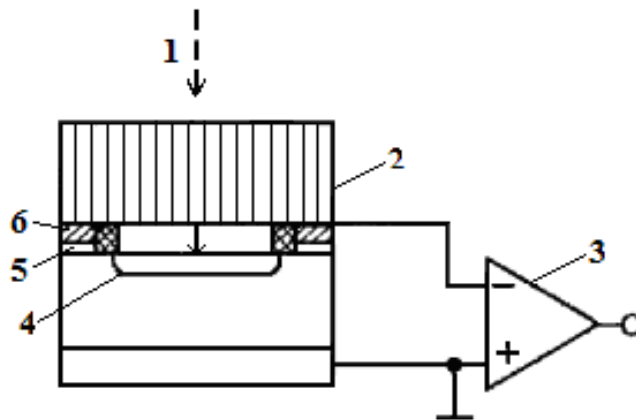


Рисунок 4.13 – Схема детектора «сцинтилятор – фотодіод»:

1 – іонізуюче випромінювання; 2 – сцинтилятор; 3 – підсилювач; 4 –  $p$ - $n$ -перехід; 5 –  $\text{SiO}_2$ ; 6 – металевий контакт

*Радіографічні детектори.* До радіографічних детекторів відносять радіографічні плівки, що застосовуються в радіографії та дозиметрії [8, 25].

Основою радіографічної плівки є гнучка прозора підкладка 4 товщиною 100–200 мкм із пластмаси – ацетатцелюлози (рис. 4.14). На

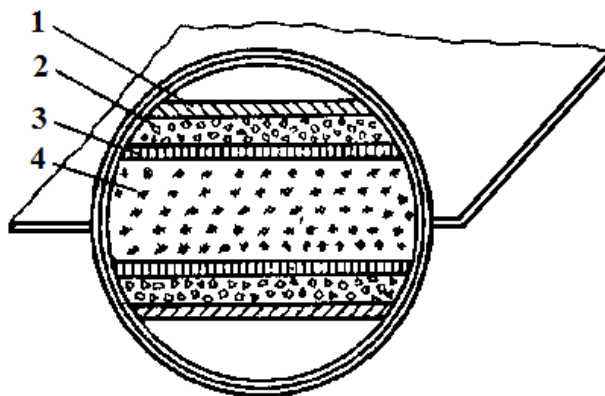


Рисунок 4.14 – Структура радіографічної плівки

підкладку із двох боків наносять чутливу до випромінювання емульсію 2, що становить шар желатини товщиною 10–30 мкм, у якому рівномірно розподілені мікрокристали бромистого срібла розміром не більше 3 мкм. Для збільшення міцності з'єднання між емульсією та підкладкою служить шар спеціального клею 3, що має

назву підшару. Зовні на емульсію наносять захисний шар 1 із задубленої желатини товщиною до 1 мкм, що захищає емульсію від механічних ушкоджень.

У мікрокристалах бромистого срібла негативні іони бромов'язані з позитивними іонами срібла силами електростатичного притягіння. По дією іонізуючого випромінювання негативний іон бромовтрачає свій валентний електрон і стає нейтральним атомом, а електрон, що звільнився, взаємодіючи з вільним позитивним іоном срібла, перетворює його в нейтральний атом срібла. Коли в кристалі бромистого срібла накопичується певна кількість атомів відновленого металевов срібла, у ньому утворюється так званий центр прихованов зображення. Для перетворення прихованов зображення у видиме радіографічну плівку обробляють у розчині проявника. У проявнику відбувається хімічна реакція відновлення бромистого срібла в металеве, причому процес відновлення проходить найбільш ефективно в кристалах, що мають центри прихованов зображення.

Зерна відновленов металевов срібла надають плівці темного забарвлення, тобто визначають її прозорість. Ступінь почорніння якої-небудь ділянки зображення залежить від кількості зерен металевов срібла на ньому і визначається інтенсивністю випромінювання  $I$  і часом його впливу на емульсію  $t$ . Добуток  $H = I \cdot t$  називають *експозицією*.

Щоб зафіксувати отримане зображення, тобто зробити його нечутливим до світла, проявлену плівку обробляють у розчині закріплювача. Закріплювач розчиняє кристали бромистого срібла, що не прореагували із проявником.

Ступінь почорніння радіографічного знімка характеризують *оптичною густиною почорніння*  $D = \lg(P_0/P)$ , де  $P_0$  – падаючий на плівку світловий потік;  $P$  – світловий потік, що пройшов через плівку. Із формули випливає, що оптична густина почорніння цілком прозоров знімка ( $P_0 = P$ ) дорівнює нулю. Оптична густина почорніння  $D = 2$  відповідає ослабленню світловов потоку в 100 разів,  $D = 3$  – у 1000 разів.

Основні радіографічні характеристики плівки визначаються характеристичною кривою, що становить собою залежність оптичної густини почорніння  $D$  від логарифма експозиції  $\lg H$ :  $D=f(\lg H)$  (рис. 4.15).

З аналізу характеристичної кривої бачимо, що до експонування плівка має деяке початкове почорніння з оптичною густиною  $D_0$ , яке називається вуаллю. Це пояснюється непрозорістю підкладки, а також здатністю деяких зерен бромистого срібла проявлятися без впливу на них випромінювання. Оптична густина вуалі тільки-но вироблених плівок не перевищує 0,2. Під час зберігання плівки густина вуалі зростає. Придатними для роботи вважаються плівки з оптичною густиною вуалі до 0,3.

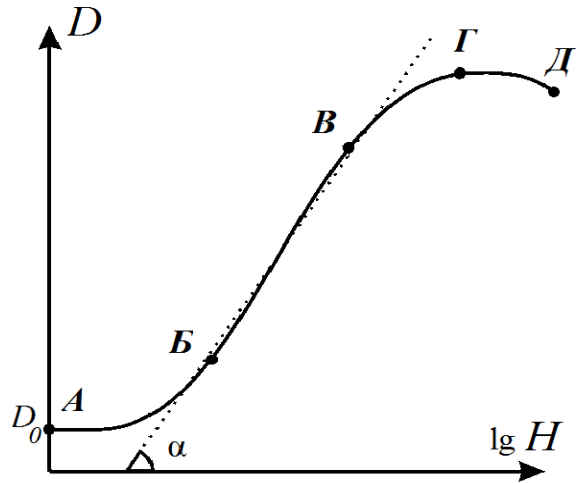


Рисунок 4.15 – Характеристична крива радіографічної плівки

Характеристичну криву можна розділити на кілька ділянок (рис. 4.15). Ділянку AB називають областю недотримувальності. У цій області густина почорніння плівки є невеликою. Ділянку BC називають областю нормальних експозицій. Тут густина почорніння пропорційна експозиції. Ця область відповідає області робочих експозицій у радіографії. На ділянці CD, або в області перетримувальності, рівним приростам експозиції відповідають нерівні прирости оптичних густин, що поступово зменшуються. Нарешті, на ділянці DE, в області соляризації, зі зростанням експозиції ступінь почорніння знімка зменшується.

Одним із важливих параметрів радіографічної плівки є її контрастність – властивість відповідати на певне збільшення експозиції більшим або меншим збільшенням оптичної густини. Від контрастності плівки залежить контрастність зображення на радіографічному знімку. Мірою контрастності плівки є коефіцієнт контрастності  $\gamma$ , що чисельно дорівнює тангенсу кута нахилу прямолінійної ділянки характеристичної кривої  $\gamma = \operatorname{tg} \alpha$  (рис. 4.15). Плівки з більш високим  $\gamma$  за тих самих умов просвічування дають більш контрастне зображення.

Іншим важливим параметром плівки є чутливість, що характеризує її здатність реєструвати іонізуюче випромінювання. Чутливість визначають за характеристичною кривою як величину, обернену експозиційній дозі у рентгенах ( $P$ ), необхідну для одержання оптичної густини, що перевищує на 0,85 (або на 2) густину вуалі. Одиницею вимірювання чутливості є  $P^{-1}$ . Якщо, наприклад, чутливість плівки дорівнює  $25 P^{-1}$ , то це означає, що для отримання оптичної густини  $D = D_0 + 0,85$  (або  $D = D_0 + 2$ ) необхідна експозиційна доза випромінювання  $1/25 P$ , де  $D_0$  – оптична густина вуалі.

Чутливість плівки залежить від розмірів зерен бромистого срібла: у плівки з більшим розміром зерна чутливість вища, ніж у дрібнозернистої. Однак збільшення розміру зерна призводить до зниження роздільної здатності плівки.

Просторова роздільна здатність радіографічної плівки характеризується максимальною кількістю пар ліній (пар штрихів) на 1 мм довжини знімка, що роздільно реєструються плівкою. Пара ліній – дві сусідні лінії (біла та чорна) однакової ширини. Роздільна здатність характеризує можливість плівки реєструвати зображення дефектів із малими просторовими розмірами та близько розташованих дефектів контрольованого об'єкта. Просторова роздільна здатність сучасних радіографічних плівок становить 20–25 пар ліній/мм.

#### **4.6. Радіаційні системи неруйнівного контролю**

Дослідження внутрішньої будови контрольованих об'єктів, виявлення в них дефектів і неоднорідностей провадиться шляхом аналізу випромінювання, що пройшло через об'єкт, і найчастіше з перетворенням тіньового радіаційного зображення у видиме. Узагальнена схема радіаційного контролю наведена на рис. 4.16.

*Джерело випромінювання ДВ* створює потік енергії відповідного виду випромінювання. Щоб випромінювання надходило лише в область, де розташований контрольований об'єкт КО, джерело випромінювання ДВ

розміщується у захисному контейнері ЗК. Для того щоб контрольований об'єкт опромінювався лише протягом певного часу, на шляху випромінювання встановлений затвор З. Випромінювання джерела ДВ може містити компоненти випромінювань різних видів або спектрального складу, у зв'язку із чим на шляху встановлюється фільтр Ф, що пропускає лише необхідну частину випромінювання. Крім того, до складу фільтра може входити коліматор, що формує форму та розміри поперечного перерізу вихідного потоку випромінювання. У контакті з контрольованим об'єктом знаходяться еталони чутливості ЕЧ та маркувальні знаки МЗ.

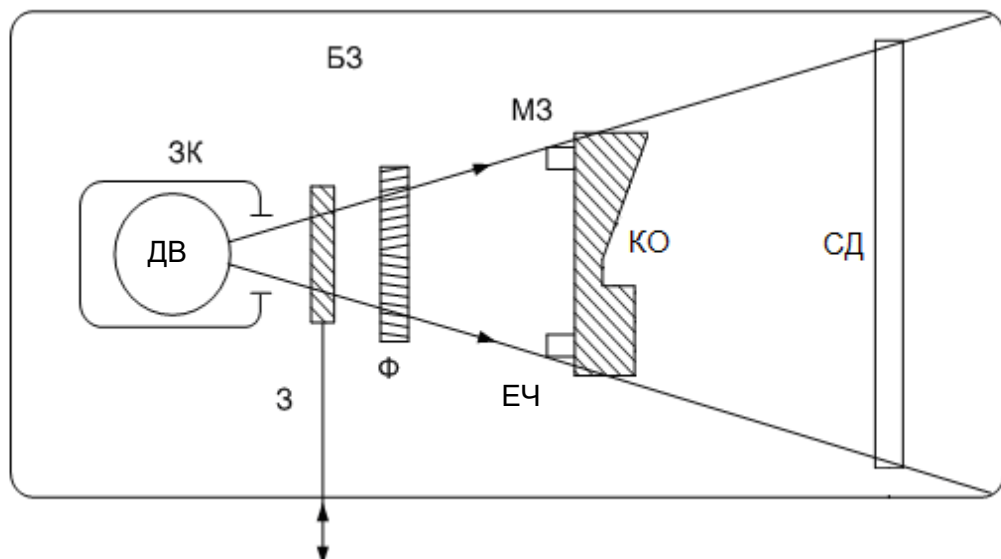


Рисунок 4.16 – Узагальнена схема радіаційного контролю

Еталони чутливості ЕЧ встановлюють у місці контрольованого об'єкта, де умови контролю найгірші (як правило, на краях), а поява дефектів малоймовірна. Вони призначені для вимірювання чутливості контролю. Поряд з еталонами чутливості можуть встановлюватись еталони для вимірювання роздільної здатності.

Маркувальні знаки МЗ служать для зручності аналізу, зберігання даних і результатів неруйнуйного контролю (нумерація знімків, зазначення режиму просвічування і т. д.). Вони поміщаються в полі зору системи

детектування СД у місці, не зайнятому зображенням контрольованого об'єкта, або в області, де поява дефектів малоімовірна.

Система детектування СД перетворює тіньове радіаційне зображення контрольованого об'єкта, що сформоване в площині СД, у видиме зображення, яке аналізує та оцінює оператор. У деяких системах детектування СД тіньове радіаційне зображення перетворюється в електричні сигнали, що потім обробляються з метою одержання необхідної інформації про контрольований об'єкт.

Для захисту оператора та навколишнього середовища від іонізуючого випромінювання апаратура для радіаційного контролю, де наявне випромінювання, захищене стінкою біологічного захисту БЗ необхідної товщини зі свинцю, сталі, бетону або іншого матеріалу (рис. 4.16).

*Система детектування радіаційних зображень* характеризується системою параметрів, що визначає її можливості з виявлення дефектів і неоднорідностей у контрольованому об'єкті. До основних параметрів системи детектування можна віднести:

- відносну чутливість контролю;
- просторову роздільну здатність;
- розмір робочого поля;
- швидкість контролю об'єктів.

Відносна чутливість контролю визначається відношенням розміру мінімального дефекту, який виявляється та розмір якого збігається з напрямком просвічування, до товщини контрольованого об'єкта і виражається у відсотках. Для вимірювання відносної чутливості застосовуються дротові та канавкові еталони чутливості [8, 25]. Відносну чутливість за дротовим еталоном  $K_d$  і канавковим еталоном  $K_k$  визначають за формулами:  $K_d = (d_{\min}/H) \cdot 100 \%$ ;  $K_k = [h_{\min}/(H + h)] \cdot 100 \%$ , де  $d_{\min}$  – діаметр найменшого виявленого дроту еталона;  $h_{\min}$  – глибина найменшої виявленої

канавки еталона;  $H$  – товщина контролюваного об'єкта;  $h$  – товщина канавкового еталона.

Просторова роздільна здатність характеризує здатність системи виявляти дефекти з малими просторовими розмірами. Вимірюється в парах ліній на міліметр. Іноді просторова роздільна здатність вимірюється діаметром найменшого одиночного дроту, що виявляється системою.

Швидкість контролю об'єктів визначається швидкістю перебігу фізичних процесів у системі детектування. Характеризує здатність системи контролювати об'єкти, що рухаються, у реальному часі.

На сьогодні існує велика різноманітність систем детектування радіаційних зображень, що різняться між собою структурою, параметрами, принципом роботи, областю застосування і т.д. На рис. 4.17 наведено класифікацію систем детектування радіаційних зображень. Системи можна поділити на два класи: системи із запам'ятовуванням зображення і системи реального часу [26].

У системах із запам'ятовуванням зображення радіаційне зображення детектується і запам'ятовується на якомусь носії (радіографічна плівка, електрорадіографічна пластина, запам'ятовувальна пластина із фотостимульованою пам'яттю). Такі системи можуть виконувати радіаційний контроль лише нерухомих об'єктів.

*Радіографія на радіографічну плівку.* Радіографічна плівка все ще є найбільш широко використовуваним детектором іонізуючого випромінювання як у промисловості, так і медичній діагностиці. До переваг радіографії потрібно віднести високу відносну чутливість контролю (1 %) у широкому діапазоні товщини контрольованих об'єктів, високу роздільну здатність (25 пар лін./мм), великий розмір робочого поля, можливість отримання внаслідок контролю документа у вигляді плівки.

Експонування плівки при радіографічному контролі може виконуватися як із використанням підсилювальних екранів, так і без них.



Рисунок 4.17 – Класифікація систем детектування радіаційних зображень

Підсилювальні екрани служать для підвищення ефективності детектування плівкою іонізуючого випромінювання і, відповідно, скорочення часу експонування. Посилювальні екрани діляться на два принципово різні види – металеві та флуоресцентні.

Підсилювальна дія металевих екранів базується на додатковому експонуванні плівки вторинними електронами, вибитими іонізуючим випромінюванням із тонкої свинцевої або свинцево-олов'яної фольги металевого екрана. Ці електрони практично повністю поглинаються плівкою. Коефіцієнт посилення металевих екранів, що дорівнює відношенню



тривалості експозиції без екрана і з ним, може доходити до 2–2,5. Спільно з плівкою зазвичай використовують пару екранів, розміщуючи їх по обидвабоки плівки.

Підсилювальні флуоресцентні екрани виготовляють із сцинтиляційних матеріалів (табл. 4.1), що перетворюють іонізуюче випромінювання у видиме світло. Фотони видимого світла практично повністю поглинаються плівкою, підвищуючи її густину почорніння. Коефіцієнт підсилення флуоресцентних екранів може становити кілька десятків. Однак значне скорочення тривалості експозиції при використанні флуоресцентних екранів супроводжується погіршенням роздільної здатності системи «екран – плівка».

Останніми роками з'явився новий тип підсилювальних екранів, що є комбінацією металевого і флуоресцентного екранів. Це флуорометалеві екрани, що поєднують шар свинцевої фольги із шаром сцинтилятора. Такі екрани дають істотне зниження часу експозиції плівки, незначно погіршуючи її роздільну здатність. Флуоресцентні екрани, так як і металеві, як правило, використовуються в комплекті із двох екранів (переднього і заднього).

Радіографія має низку істотних недоліків: низьку продуктивність і високу трудомісткість контролю через необхідність хімічної обробки плівки, а також високу вартість контролю через наявність у плівці срібла. Обсяги застосування плівкової радіографії з кожним роком зменшуються у зв'язку з появою і вдосконаленням нових систем детектування радіаційних зображень.

*Комп'ютерна радіографія із запам'ятовувальними пластинами.* У комп'ютерній радіографії для отримання зображення замість плівки застосовуються спеціальні запам'ятовувальні пластини багаторазового користування [25,26]. Пластини мають типові для радіографічної плівки розміри  $18 \times 24$ ,  $18 \times 30$ ,  $24 \times 30$  і  $35 \times 43$  см. Для запам'ятовування зображення в пластині використовується шар з фотостимульованою пам'яттю – складною хімічною сполукою. Найчастіше використовується сполука типу  $\text{BaFBr}_x\text{I}_{1-x}:\text{Eu}^{2+}$ .

Під час експонування пластини, розміщеної за контрольованим об'єктом, під дією іонізуючого випромінювання електрони всередині шару з фотостимульованою пам'яттю збуджуються і захоплюються на енергетичні рівні (пастки), на яких можуть перебувати протягом тривалого часу.

Після експонування пластину вставляють у спеціальний сканер, у якому вона сканується лазерним пучком. Схема процесу сканування запам'ятовувальної пластини та отримання цифрового зображення показана на рис. 4.18. При скануванні пластини лазерним пучком електрони вивільняються з пасток, що супроводжується емісією видимого світла, довжина хвилі якого відрізняється від довжини хвилі випромінювання сканувального лазера. Це світло збирається фотоприймачем (фотопомножувачем) і перетворюється в електричний сигнал. Після його підсилення й аналого-цифрового перетворення комп'ютер формує на екрані монітора цифрове зображення контрольованого об'єкта.

Оскільки зчитування прихованого зображення, сформованого на запам'ятовувальній пластині під час її експонування, можливе лише з використанням комп'ютерної техніки, радіаційний контроль за допомогою таких систем отримав назву комп'ютерної радіографії.

Відмінність запам'ятовувальних пластин від радіографічної плівки – можливість їх багаторазового використання (кілька тисяч разів без втрати якості). Пластини сумісні із джерелами іонізуючого випромінювання, що мають енергію від 10 кеВ до 20 МеВ (рентгенівські апарати неперервної дії та імпульсні, бетатрони, радіоізотопні джерела).

Запам'ятовувальні пластини є гнучкими і, подібно плівці, можуть набирати форму контрольованого об'єкта. З процесу комп'ютерної радіографії виключена хімічна обробка плівки, час отримання зображення становить від 1 до 2 хвилин. Зображення зберігаються в електронному вигляді й можуть піддаватися цифровій обробці з метою покращання виявлення дефектів.

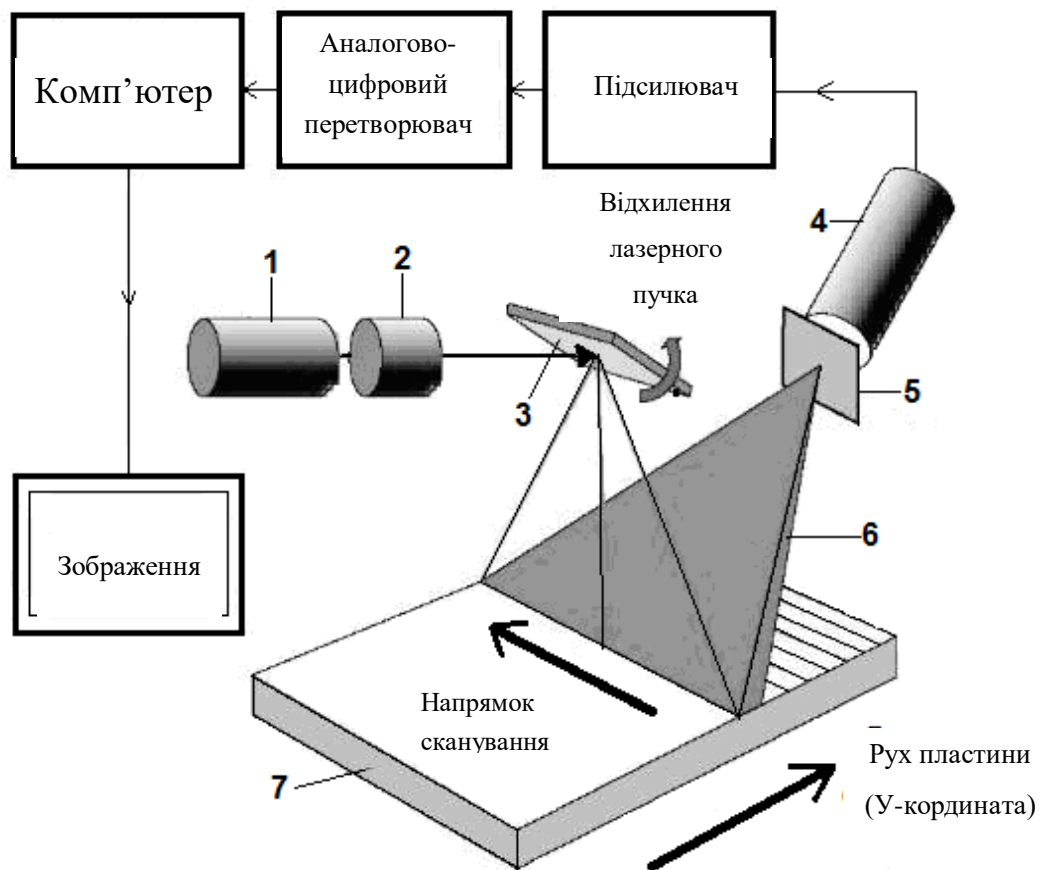


Рисунок 4.18 – Схема процесу сканування запам'ятовувальної пластини та отримання цифрового зображення:

1 – лазер; 2 – оптична система формування пучка; 3 – дзеркало; 4 – фотопомножувач; 5 – фільтр; 6 – оптична система збору світла люмінесценції; 7 – запам'ятовувальна пластина

За своїм динамічним діапазоном комп'ютерна радіографія перевершує плівкову радіографію, що дозволяє виконувати контроль об'єктів із великим перепадом товщини за одну експозицію. Комп'ютерна радіографія забезпечує відносну чутливість контролю, порівняну з плівковою радіографією, а роздільну здатність – до 20 пар лін./мм. До недоліків таких систем можна віднести високу вартість комплексу обладнання для комп'ютерної радіографії.

*Електрорадіографія.* Як детектор іонізуючого випромінювання при електрографії використовують електрорадіографічні селенові пластини (див.

п. 4.5). Процес отримання електрорадіографічного знімка складається з таких операцій:

- зарядки (електризації);
- експонування пластини, розміщеної за контрольованим об'єктом;
- проявлення прихованого електростатичного зображення;
- перенесення проявленого порошкового зображення з пластини на папір;
- закріплення зображення на папері;
- очищення пластини від залишків проявника.

Усі операції електрорадіографічного контролю, крім операції експонування, виконуються в спеціальних електрорадіографічних апаратах типу «ЕРГА». Порівняно з плівковою радіографією електрорадіографія прискорює процес отримання зображення (всі операції, крім експонування, виконуються за 45–75 с). Електрорадіографічні пластини мають розміри  $10 \times 30$ ,  $10 \times 40$ ,  $24 \times 30$  і  $30 \times 40$  см та витримують близько 2000 експозицій.

Відносна чутливість контролю електрорадіографії при просвічуванні алюмінієвих і титанових сплавів відповідає чутливості плівкової радіографії, а при контролі сталевих об'єктів дещо гірше останньої. Роздільна здатність електрорадіографії становить 8–12 пар лін./мм .

*Системи реального часу* (рис. 4.17) дозволяють виконувати радіаційний контроль як нерухомих, так і рухомих об'єктів у реальному часі. Вони поділяються на системи *непрямого перетворення* та системи *прямого перетворення*.

У системах непрямого перетворення тіньове радіаційне зображення за допомогою сцинтилятора перетворюється спочатку в світлове, яке потім перетворюється в електричний сигнал. Далі електричний сигнал використовується для формування вихідного зображення системи детектування .

У системах прямого перетворення тіньове радіаційне зображення безпосередньо перетворюється в електричний сигнал, що використовується для формування вихідного зображення.

*Рентгенотелевізійні системи (РТВС) на основі РЕОП.* У таких системах детектування перетворювачем рентгенівського випромінювання у видиме є рентгенівський електронно-оптичний перетворювач (РЕОП), що одночасно виконує функції підсилювача яскравості зображення. Рентгенівський електронно-оптичний перетворювач – це електровакуумний прилад із залишковим тиском  $10^{-7}$  мм рт. ст., схема якого наведена на рис. 4.19. На вході РЕОП розташований екранно-катодний вузол, що складається з сцинтиляційного екрана 1 і перебуває з ним в оптичному контакті фотокатода 2. Екран 1 перетворює тіньове рентгенівське зображення у видиме. Фотокатод 2 під дією світлових фотонів за рахунок зовнішнього фотоефекту випускає електрони, які прискорюються і фокусуються електронно-оптичною системою РЕОП. Електронно-оптична система утворена електродами 3, 4 і 5, на які відносно екранно-катодного вузла подаються певні високі напруги. Прискорені й сфокусовані електрони бомбардують вихідний екран 6, виготовлений із дрібнозернистого люмінофора і розташованого на внутрішньому боці вихідного вікна РЕОП. Унаслідок такого бомбардування електронами люмінофорний екран 6 перетворює електронне зображення у видиме зображення високої яскравості.

Перетворення вхідного рентгенівського зображення у вихідне супроводжується зменшенням його розміру приблизно в 10 разів. Таким чином, в РЕОП спостерігається потрібне перетворення зображення: рентгенівського у видиме, видиме в електронне та електронного знову у видиме.

Діаметр робочого поля різних типів РЕОП становить від 120 до 350 мм. Найбільш поширені 9-дюймові РЕОП з діаметром робочого поля 230 мм. Діаметр вихідного екрана становить 15, 20, 25, 30 або 35 мм. Вхідні екрани у сучасних РЕОП виготовляють переважно з йодиду цезію (CsI). Для

поліпшення взаємної спектральної відповідності фотокатода та екрана CsI як активатор у нього вводять натрій (Na).

Зображення, сформоване на вихідному екрані РЕОП, за допомогою оптичної системи переносять на вхід перетворювача світло – сигнал телевізійної камери. Як перетворювачі світло – сигнал в сучасних телевізійних камерах застосовують матриці на основі приладів із зарядовим зв'язком (ПЗЗ-матриці), а також КМОП-сенсори. Електричний відеосигнал з виходу телевізійної камери подають на телевізійний монітор, на якому відтворюється рентгенотелевізійне зображення контрольованого об'єкта, а також у комп'ютер для обробки та архівування зображень.

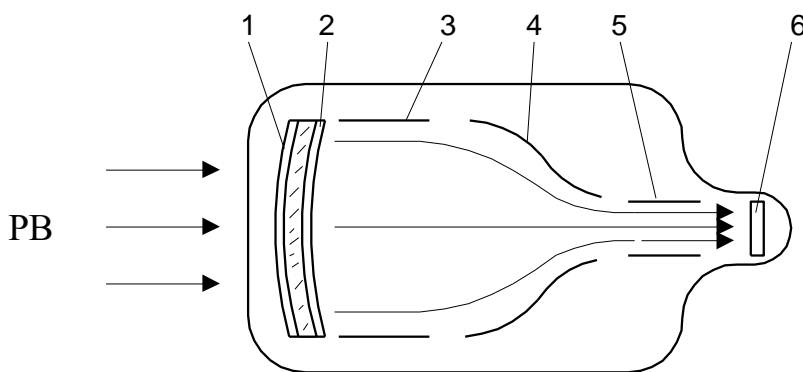


Рисунок 4.19 – Рентгенівський електронно-оптичний перетворювач:

1 – сцинтиляційний екран; 2 – фотокатод; 3, 4 і 5 – електроди електронно-оптичної системи; 6 – вихідний екран; РВ – рентгенівське випромінювання

Рентгенотелевізійні системи на основі РЕОП та телевізійної камери широко застосовуються для неруйнівного контролю об'єктів, що рухаються зі швидкістю до 3 м/хв. Відносна чутливість контролю таких систем становить 2 – 3%, роздільна здатність – від 3 до 5 пар лін./мм.

*Рентгенотелевізійні системи «сцинтилятор – ПЗЗ».* Такі системи мають ряд переваг перед системами на основі РЕОП: можливість зміни сцинтиляційного екрана, що дозволяє змінювати розмір робочого поля та інші параметри системи; простота конструкції; низька вартість та ін. Схема РТВС «сцинтилятор – ПЗЗ» наведена на рис. 4.20.

Сцинтиляційний екран перетворює тіньове рентгенівське зображення контрольованого об'єкта у видиме. Перенесення видимого зображення з екрана на ПЗЗ-матрицю телевізійної камери відбувається з поворотом на  $90^\circ$ , оскільки оптична система складається з об'єктива і дзеркала. Для захисту від прямого рентгенівського випромінювання, що може призводити до деградації ПЗЗ-матриці, телевізійна камера розміщена в захисному свинцевому екрані.

Як сцинтилятори в таких системах застосовують йодид цезію, активований талієм CsI (Tl), та оксисульфід гадолінію, активований тербієм  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$  (Tb) (табл.4.1).

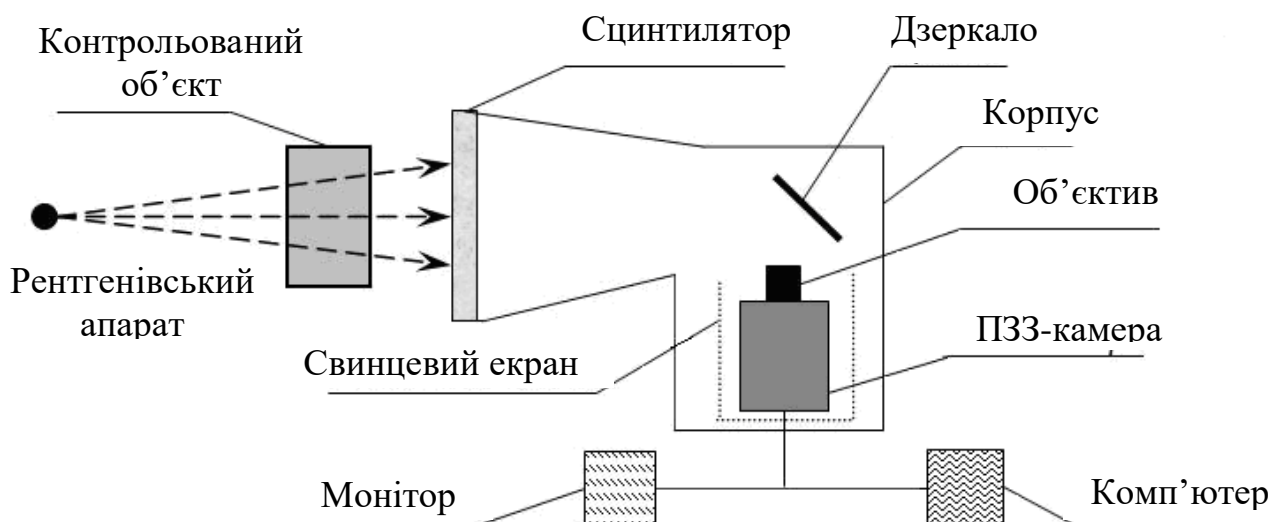


Рисунок 4.20 – Схема рентгенотелевізійної системи «сцинтилятор – ПЗЗ»

Через низьку яскравість світіння сцинтиляційних екранів у телевізійних камерах таких систем необхідно застосовувати високочутливі ПЗЗ-матриці. Придатні, наприклад, ПЗЗ-матриці з мікролінзами фірми Sony (технологія EXview HAD CCD). Для підвищення відносної чутливості контролю та зменшення шумів на зображенні застосовують режим тривалого накопичення зображень на ПЗЗ-матриці. Переведення ПЗЗ-матриці в режим тривалого накопичення зображень, поряд із підвищенням чутливості, дозволяє

використовувати для просвічування об'єктів малогабаритні імпульсні рентгенівські апарати. Збільшення можливих тривалостей накопичення зображень можливе за рахунок охолодження ПЗЗ-матриці за допомогою елементів Пельтьє.

Відносна чутливість контролю РТВС «сцинтилятор – ПЗС» відповідає чутливості плівкової радіографії. Роздільна здатність таких систем, що залежить від роздільної здатності екрана та ПЗЗ-матриці, а також розміру робочого поля, становить від 2 до 10 пар лін./мм.

*Системи на основі плоскопанельних (лінійних) детекторів.* Останніми роками розроблені плоскопанельні матричні й лінійні детектори іонізуючого випромінювання на основі напівпровідникових структур (рис. 4.17). У детекторах непрямого перетворення (типу «сцинтилятор – напівпровідник») використовується проміжне перетворення іонізуючого випромінювання у видиме. У детекторах прямого перетворення іонізуюче випромінювання безпосередньо перетворюється в електричний сигнал. Найбільш поширеними на сьогодні є плоскопанельні детектори непрямого перетворення [26].

У якості плоскопанельних детекторів «сцинтилятор – напівпровідник» найчастіше використовують панелі на основі аморфного кремнію (a-Si) в комбінації із сцинтилятором на основі оксисульфіду гадолінію  $Gd_2O_2S$  або йодиду цезію CsI. Схеми таких плоскопанельних детекторів наведені на рис. 4.21. Сцинтилятори перетворюють рентгенівське випромінювання у видиме світло, що надходить на матрицю фотодіодів із аморфного кремнію і конвертується в електричний заряд. Чутливість і роздільна здатність детектора із сцинтилятором із  $Gd_2O_2S$  залежить від товщини та розмірів зерна (зернистості) сцинтилятора. Однак при збільшенні його товщини зростає розсіювання світла і погіршується роздільна здатність детектора (рис. 4.21 а).

Для зменшення розсіювання світла в сцинтиляторі й збільшення роздільної здатності детектора застосовують сцинтилятор із CsI з монокристалічною голчастою структурою (рис. 4.21 б). Монокристали CsI



голчатої структури орієнтовані перпендикулярно до поверхні сцинтилятора і направляють світло до фотодіодної матриці як по оптоволокну (тобто без розсіювання).

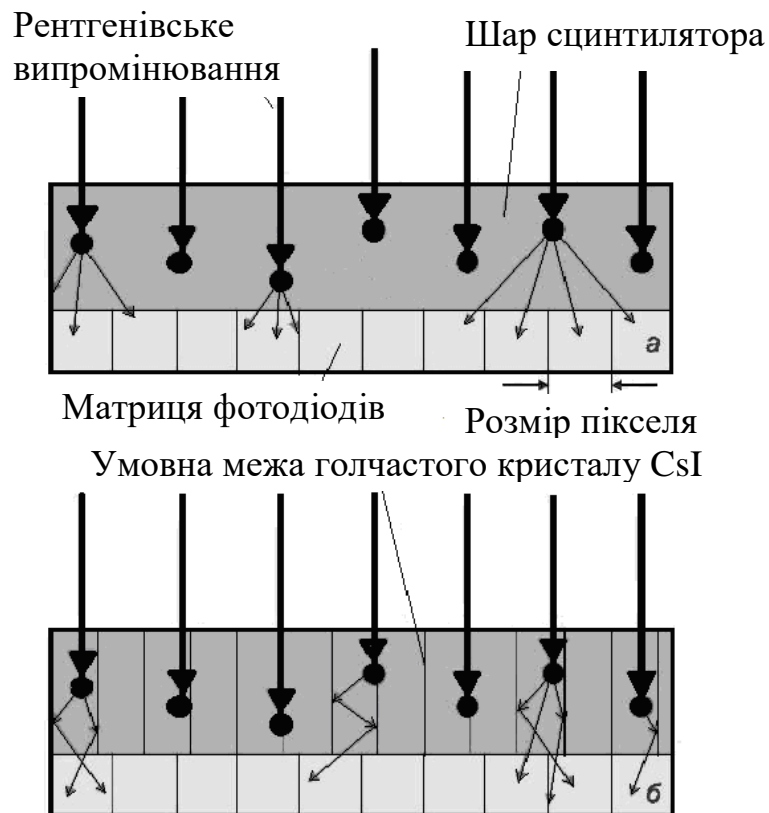


Рисунок 4.21 – Схема плоскпанельного детектора непрямого перетворення «сцинтилятор – напівпровідник» на основі аморфного кремнію: а – на основі сцинтилятора  $Gd_2O_2S$ ; б – на основі сцинтилятора CsI

Плоскопанельні детектори непрямого перетворення є з'єднанням фотодіодів із нанесеним на них сцинтилятором на активній TFT-матриці (TFT – thin film transistors, або тонкоплівковий транзистор). Матриця TFT-транзисторів є досить простою структурою електронних перемикачів (типова схема елемента матриці TFT-транзисторів показана на рис. 4.22).

Ємність фотодіода 1 у початковому стані заряджена до напруги  $U_+$ . При опроміненні світлом вона розряджається тим більше, чим більша інтенсивність світла на фотодіоді. При зчитуванні TFT-транзистор 2 відкривається і ємність знову заряджається через зчитувальний підсилювач

до напруги  $U_+$ . Величина заряду ємності перетворюється підсилювачем зчитування 3 в напругу, що подається на аналого-цифровий перетворювач.

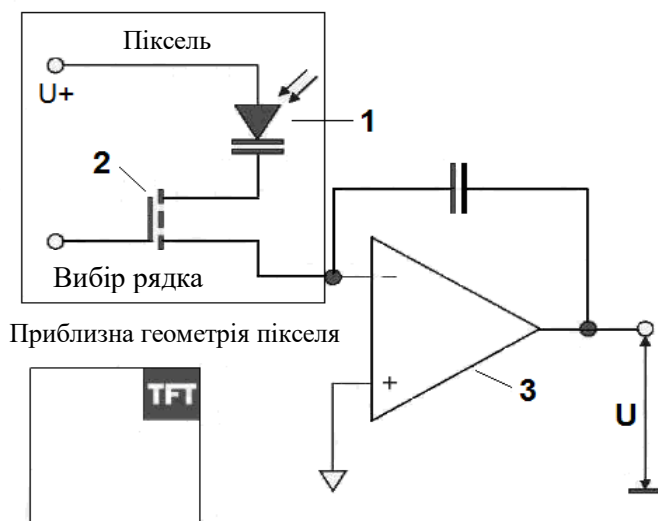


Рисунок 4.22 – Схема елемента матриці TFT-транзисторів: 1 – фотодіод; 2 – тонкоплівковий (TFT) транзистор; 3 – підсилювач зчитування

Максимальні розміри плоскпанельних детекторів «сцинтилятор – напівпровідник» становлять  $40 \times 40$  см, а роздільна здатність – до 10 пар ліній/мм, що відповідає розміру пікселя 50 мкм.

Відмітною особливістю аморфного кремнію є висока радіаційна стійкість, що дозволяє застосовувати такі детектори при високих енергіях рентгенівського випромінювання. Оскільки процес виробництва плоскпанельних детекторів на базі аморфних напівпровідників і TFT-технології вимагає спеціального технологічного устаткування, такі детектори є досить дорогими.

У плоскпанельних детекторах прямого перетворення напівпровідниковий шар розміщений безпосередньо на матриці TFT-транзисторів (рис. 4.23). У напівпровідниковому шарі при впливі рентгенівського випромінювання всередині напівпровідника генеруються електронно-діркові пари. Під дією прикладеної напруги виникає електронний струм, що підсилюється за допомогою зчитувальної електроніки і використовується для формування зображення контрольованого об'єкта.

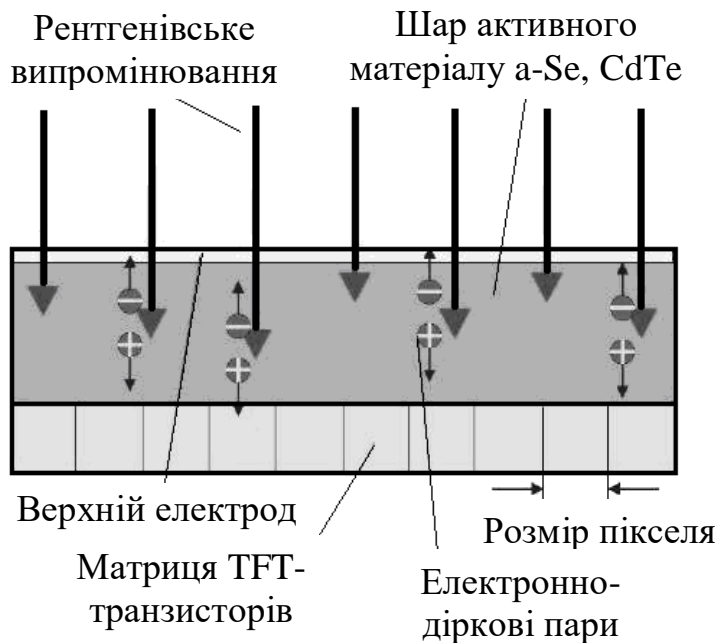


Рисунок 4.23 – Схема реєстрації рентгенівського випромінювання плоскостанельним детектором прямого перетворення

Найбільш поширеними варіантами детекторів прямого перетворення є панелі на основі аморфного селену (a-Se) і монокристалічного телуриду кадмію (CdTe). У першому випадку матриця тонкоплівкових транзисторів (TFT) покривається шаром аморфного селену, що дозволяє перетворити рентгенівське випромінювання безпосередньо в цифровий сигнал без використання сцинтиляторів. Унаслідок цього досягається якість зображення, характерна для середньозернистої радіографічної плівки. Недоліком детекторів на основі аморфного селену є вузький діапазон робочих температур. Як під час роботи, так і при зберіганні температура детектора повинна знаходитися в діапазоні від 5 до 30°C для того, щоб уникнути кристалізації селенового шару.

Плоскостанельні детектори прямого перетворення на основі CdTe можуть працювати в набагато ширшому температурному діапазоні при енергіях рентгенівського випромінювання до 300 кеВ, маючи при цьому в кілька разів більшу чутливість. У комплекті з плоскостанельними детекторами зазвичай поставляється спеціальне програмне забезпечення для їх калібрування та корекції дефектних пікселів.

На рис. 4.24 показаний зовнішній вигляд плоскопанельних детекторів непрямого перетворення на основі сцинтилятора CsI (а) і прямого перетворення на основі CdTe (б).



Рисунок 4.24 – Плоскопанельні детектори непрямого перетворення з сцинтилятором CsI (а) і прямого перетворення на основі CdTe (б)

Лінійні детектори прямого і непрямого перетворення на основі напівпровідникових структур (рис. 4.17) застосовуються в сканувальних системах радіаційного контролю. У таких системах зображення формується внаслідок просвічування вузьким віяловим пучком випромінювання контрольованого об'єкта, що рухається зі сталою швидкістю відносно детектора. Сканувальний метод радіаційного контролю дозволяє отримувати більш якісні рентгенівські зображення контрольованого об'єкта за рахунок виключення потрапляння на детектор розсіяного випромінювання, що погіршує контраст тіньового рентгенівського зображення.

*Рентгенотелевізійні системи на основі рентгеновідиконів* належать до систем прямого перетворення, основою яких є спеціальні передавальні телевізійні трубки – рентгеновідикони. Конструкція рентгеновідикона подібна до конструкції відиконів, що працюють у діапазоні видимого світла.

Принциповою відмінністю рентгеновідиконов, що дозволяє використовувати його для перетворення рентгенівського випромінювання в електричний сигнал, є напівпровідникова мішень, чутлива до рентгенівського випромінювання. Мішень рентгеновідикона виготовляють із аморфного

селену, окису свинцю, окису цинку та інших сполук. Випускаються рентгеновідикони з діаметром робочого поля 18, 90 і 150 мм. Роздільна здатність рентгеновідиконів залежить від діаметра робочого поля і становить: для відиконів з робочим полем 18 мм – 20 пар лін./мм, для відиконів з робочим полем 90 мм – 7 пар лін./мм, а для відиконів з робочим полем 150 мм – 3 пари лін./мм. Рентгенотелевізійні системи на основі рентгеновідиконів забезпечують контроль рухомих об'єктів із відносною чутливістю 1,5–2 %.

Рентгеновідикони з діаметром робочого поля 18 мм і роздільною здатністю 20 пар лін./мм застосовуються в рентгенотелевізійних мікроскопах для неруйнівного контролю компонентів електронної техніки та мікроелектроніки, а також малогабаритних механічних вузлів і деталей. У таких мікроскопах використовується ефект геометричного збільшення тіньового рентгенівського зображення контрольованого об'єкта при збільшенні відстані між об'єктом і мішенню рентгеновідикона, а для отримання досить різкого зображення у якості джерела випромінювання застосовують мікрофокусні рентгенівські трубки.

До радіаційних систем неруйнівного контролю можна також віднести промислові рентгенівські обчислювальні томографи.

Промислова рентгенівська томографія є високоефективним методом неруйнівного контролю. Вона стала можливою у зв'язку із широким впровадженням комп'ютерів, що мають високі швидкодії та об'єм пам'яті. Обчислювальна томографія реалізує можливість вирішення зворотного завдання інтроскопії – за інформацією про інтенсивність випромінювання, що пройшло крізь контрольований об'єкт у різних напрямках, знайти розподіл лінійного коефіцієнта ослаблення, пов'язаного із густиною матеріалу всередині об'єму контрольованого об'єкта.

Реалізація рентгенівської обчислювальної томографії ґрунтується на різних способах реконструкції зображення, серед яких найчастіше віддають перевагу алгоритму зворотного проектування [4,8].

Рентгенівські обчислювальні томографи дають можливість вирішувати багато завдань неруйнівного контролю – як завдання інтроскопії, так і кількісної оцінки параметрів різних об'єктів. Найбільше застосування такі томографи знайшли для контролю об'єктів із невеликим загасанням випромінювання, зокрема об'єктів із легких сплавів, композитних матеріалів, гуми, дерева і т. п., матеріалів товщиною до 20 мм із зовнішніми розмірами до 1,5 м при роздільній здатності за коефіцієнтом лінійного ослаблення 0,5 %.

#### **4.7 Спеціальні методи радіаційного контролю**

Низку завдань неруйнівного контролю доцільно вирішувати, застосовуючи нетрадиційні методи, що базуються на реалізації специфічних методик. До таких методів контролю, застосування яких сьогодні розширюється, належать: нейтронна радіографія, протонна радіографія, авторадіографія, метод проникних радіоактивних газів, контроль за допомогою позитронів, рентгеноструктурний та рентгеноспектральний аналіз. Контроль цими методами здійснюється за технологією, близькою до радіографії [1, 4–7].

*Нейтронна радіографія* базується на опроміненні контрольованого об'єкта нейтронами та реєстрації інтенсивності випромінювання, що пройшло через об'єкт. Взаємодія нейтронів із речовиною в значно більшому ступені залежить від хімічного складу контрольованого об'єкта та енергії нейтрона, що визначає перспективи такого контролю. Принципово важливою перевагою нейтронної радіографії є можливість роздільного контролю хімічних компонентів матеріалу. Наприклад, із використанням звичайних методів неможливо виявити навіть наявність легких або органічних матеріалів на сталі при близьких товщинах. Нейтронна радіографія дозволяє проводити контроль деталей розміром близько 1 мм із органічних матеріалів крізь шари металів товщиною в сантиметри. Це відкриває широкі та

різноманітні області застосування нейтронних методів для неруйнівного контролю складних багатошарових виробів.

Методи нейтронної радіографії застосовують для контролю вузлів і деталей (теплоізолятори, ущільнювальні прокладки, електроізолювальні пластини і т. д.) з легких матеріалів, наприклад пластмас, матеріалів органічного походження як окремо, так й у складі складних виробів із важких матеріалів. За допомогою нейтронів легко виявляються включення, що містять водень, у металах і аналізується їх розподіл. Ефективне використання нейтронних методів при контролі багатокомпонентних багатошарових напівфабрикатів і виробів, а також біологічних об'єктів. Нейтронна радіографія доповнює рентгено- і гаммаграфію більш повними та достовірними даними про контрольований об'єкт.

*Протонна радіографія* базується на використанні потоку протонів ( $\alpha$ -часток) для неруйнівного контролю та базується на особливостях поширення і взаємодії їх із речовиною. Послідовність контролю, основне обладнання для контролю – такі самі, що й при рентгено- та гаммаграфії. Головною областю застосування протонної радіографії є контроль тонких виробів або їх частин, оскільки протони поглинаються порівняно тонкими шарами матеріалів. В окремих випадках протонна радіографія дуже ефективна і дає на порядок більш високу (до 0,1 %) дефектоскопічну чутливість. Прикладом реалізації протонної радіографії є контроль алюмінієвої фольги товщиною у десять частки міліметра.

*Контроль за допомогою позитронів* може бути застосований для визначення накопичення втомних напружень у металах і величини пластичної деформації. Цей контроль ґрунтується на тому, що в початковій стадії втомних явищ, коли відбувається утворення дислокацій, у їх областях накопичуються негативні заряди. Позитрони, що опромінюють метал, притягуються до областей розташування дислокацій і взаємодіють із електронами. При анігіляції позитрона та електрона виникають  $\gamma$ -кванти. За

кількістю  $\gamma$ -квантів і середнім часом життя позитронів можна визначити початок втомних порушень у металі.

*Рентгеноструктурний аналіз.* Рентгеноструктурний аналіз є найпоширенішим експериментальним методом дослідження атомної будови кристалічних матеріалів. Він базується на вивченні дифракційної картини, що виникає при когерентному розсіюванні рентгенівського випромінювання на досліджуваному об'єкті. Для одержання дифракційної картини необхідно довгохвильове випромінювання із довжинами хвиль, порівнянними з розмірами деталей атомної структури кристалів. Аналіз дифракційної картини дозволяє визначати атомно-кристалічну структуру об'єкта (визначати симетрії, параметри елементарних комірок, координати атомів, довжину зв'язків і кути між атомами, топологію структури).

*Рентгеноспектральний аналіз.* Рентгеноспектральний аналіз широко застосовується для якісного та кількісного визначення елементного складу різних речовин у промисловості (металургія, хімія, видобуток корисних копалин і т. д.) та наукових дослідженнях. Найпоширенішим є флуоресцентний метод рентгеноспектрального аналізу, що ґрунтується на збудженні ліній флуоресцентного (характеристичного) випромінювання елементів, що містяться в досліджуваній речовині (пробі), і подальшому вимірюванні довжин хвиль та інтенсивності цих ліній. Вимірювання інтенсивності здійснюється відносним методом із використанням еталонів відомого хімічного складу. За довжинами хвиль аналітичних ліній здійснюється ідентифікація, а за їх інтенсивністю— кількісне визначення елементів.

Поряд із типовими методиками радіаційного контролю розробляються різні способи одержання та обробки інформації, що підвищують його чутливість і достовірність. До таких способів належать: застосування кольорових радіограм і кольорове контрастування зображень, одержання стереозображень та ін. Усі ці способи спрямовані на одержання більшого обсягу інформації про контрольований об'єкт.



#### **4.8 Теми практичних (семінарських) занять і контрольні питання до розділу 4**

##### **Теми практичних (семінарських) занять**

1. Взаємодія іонізаційного випромінювання з речовиною (п. 4.3).
2. Радіоізотопні джерела випромінювання (п. 4.4).
3. Прискорювачі заряджених частинок (п. 4.4).
4. Джерела рентгенівського випромінювання (п. 4.4).
5. Детектори іонізуючого випромінювання (п. 4.5).
6. Системи детектування радіаційних зображень: системи із запам'ятовуванням зображення (п. 4.6).
7. Системи детектування радіаційних зображень: системи реального часу (п. 4.6).
8. Спеціальні методи радіаційного контролю (п. 4.7).

##### **Контрольні питання**

1. Які основні типи джерел іонізуючих випромінювань вам відомі? Дайте їх характеристики.
2. Якими основними фізичними величинами характеризується іонізуюче випромінювання?
3. У чому полягають особливості взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною?
4. У чому полягає принцип роботи радіоізотопних джерел випромінювання? Наведіть приклад їх виконання.
5. У чому полягає принцип роботи бетатрона? Поясніть на прикладі однієї зі схем конструкції.
6. Чим відрізняється лінійний прискорювач від циклічного? Наведіть схему лінійного прискорювача.
7. Які основні принципи закладені в схему побудови рентгенівської трубки неперервної дії? Наведіть типову схему трубки.
8. Які основні принципи закладені в схему побудови імпульсної рентгенівської трубки? Наведіть схему трубки.

9. Які основні типи детекторів іонізуючого випромінювання вам відомі? Дайте їх характеристику.

10. Поясніть принцип роботи іонізаційних детекторів іонізуючого випромінювання.

11. Поясніть принцип роботи напівпровідникових детекторів іонізуючого випромінювання.

12. Поясніть принцип роботи радіolumінесцентних детекторів іонізуючого випромінювання.

13. Поясніть принцип роботи радіографічних детекторів іонізуючого випромінювання.

14. Які системи детектування радіаційних зображень із запам'ятовуванням зображення вам відомі? Дайте їх характеристику.

15. Які системи детектування радіаційних зображень реального часу з непрямым перетворюванням зображень вам відомі? Дайте їх характеристику.

16. Які системи детектування радіаційних зображень реального часу з прямим перетворюванням зображень вам відомі? Дайте їх характеристику.

17. Які спеціальні методи радіаційного контролю вам відомі? Дайте їх характеристику.

## **5. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ТА АКУСТИЧНІ РЕЗОНАНСИ У МІКРОДІАГНОСТИЦІ ТВЕРДИХ ТІЛ ТА ПЛАЗМИ**

Проблема поширення електромагнітних хвиль у металах та їх взаємодії з електронами провідності останнім часом привертає увагу багатьох дослідників. Це пов'язано насамперед із бурхливим розвитком мікрохвильової електроніки, успішним освоєнням технології отримання надчистих і досконалих монокристалів, застосуванням сильних магнітних полів, низьких температур, ультрависокого вакууму та ін. Друга причина обумовлена незвичайним характером високочастотних властивостей (ВЧ-властивостей) електронно-діркової плазми металів. Так, було з'ясовано, що класичне уявлення про скін-ефект, при якому зовнішнє електромагнітне випромінювання практично повністю локалізується в тонкому приповерхневому шарі й не проникає вглибину металу, в багатьох випадках не відповідає дійсності. Реальна картина виявилася значно складнішою. Були відкриті нові резонансні явища, ефекти аномальної прозорості металів, прояви макроскопічної квантової когерентності у взаємодії між електронами, електромагнітними і звуковими хвилями. В результаті виникла ціла галузь науки – вивчення плазмових ВЧ-властивостей металів. Більшість із них не має аналогів ні в напівпровідниках, ні в газовій плазмі й відрізняється настільки, що можна говорити про специфічну фізику металевого плазмового стану. Електронні резонанси та хвильові процеси в металах стали досить ефективними, а в ряді випадків унікальним методом експериментального дослідження електронного енергетичного спектра, кінетичних характеристик, нелінійних властивостей і явищ.

У дослідженнях високочастотних властивостей напівпровідників можна умовно виділити такі напрямки: плазмові властивості напівпровідників; нелінійне поширення електромагнітних хвиль у напівпровідниках, пов'язане з тепловим впливом цих хвиль на електронну

підсистему; резонансні явища та електромагнітні властивості феромагнітних напівпровідників і напівпровідників із надґратками.

Крім електромагнітних хвиль, ефективним способом мікродіагностики матеріалів є акустичні методи досліджень в області ультразвукових частот (100–1000 МГц) і гіперзвукових частот (вище Гц<sup>11</sup>).

Застосування акустичних методів дослідження фізичних властивостей твердих тіл базується на здатності звукових коливань поширюватись у пружних середовищах на великі відстані без значного загасання. У металах унаслідок сильної взаємодії електронів провідності з акустичними фононами в характері поглинання або дисперсії швидкості звуку виявляються особливості фонон-електронної взаємодії, електронного енергетичного спектра, зонної структури провідників.

Для ультразвукових досліджень при гелієвих температурах у діапазоні частот 100–1000 МГц необхідні насамперед ефективні способи збудження та детектування акустичних коливань і їх передавання через поверхні розділу між досліджуваними кристалами та ультразвуковими датчиками.

Гіперзвук, маючи дуже малу довжину хвилі, є дуже тонким інструментом, і його використання дає можливість успішно поєднувати велику роздільну здатність, властиву оптичним методам, з високою чутливістю, яку забезпечують сучасні засоби обробки електромагнітних сигналів надвисоких частот (НВЧ) [10]. Проте можливості гіперзвукових хвиль реалізовані ще далеко не повністю. Це пов'язано насамперед з тим, що на сьогодні освоєні гіперзвукові хвилі відносно низьких частот (до 10 ГГц), для яких розроблені ефективні методи збудження, трансляції та детектування. Використання більш високочастотних гіперзвукових хвиль (вище Гц<sup>11</sup>), що належать до міліметрового і субміліметрового діапазонів, становить значний інтерес як з точки зору фізичних досліджень твердого тіла, так і для вирішення ряду практично важливих завдань радіоелектроніки НВЧ. Так, застосування гіперзвуку із частотами міліметрового діапазону в спектроскопії акустичного парамагнітного резонансу (АПР) дозволяє

досліджувати збуджені стани парамагнітних центрів у різних діелектричних і напівпровідникових кристалах. Це особливо важливо під час вирішення актуальної проблеми створення напівпровідникових матеріалів із заданими наперед електрофізичними властивостями. Вивчення методами гіперзвукової АПР-спектроскопії енергетичного спектра та електрон-фононної взаємодії домішкових центрів у напівпровідниках допоможе вирішити ряд важливих питань, пов'язаних з механізмами компенсації глибоких донорів і акцепторів, впливом їх на електричні та оптичні властивості напівпровідникових матеріалів.

### **5.1 Високочастотні та резонансні властивості металів**

Класичне уявлення про властивості металів в області НВЧ полягало в тому, що вони малочутливі до дії зовнішніх полів і зміни температури.

Вважалося, що при низьких температурах змінюється лише характер скін-ефекту – замість звичайного (класичного) він перетворюється на аномальний, при якому довжина вільного пробігу електронів стає більшою за товщину скін-шару. В умовах аномального скін-ефекту дещо модифікується частотна залежність поверхневого імпедансу, але головне – швидке загасання електромагнітного поля залишається незмінним, як і при нормальному скін-ефекті. Були, на перший погляд, і досить переконливі фізичні міркування на користь неможливості будь-яких резонансних явищ при аномальному скін-ефекті.

У минулому сторіччі був передбачений циклотронний резонанс (ЦР) у металах і сформульовані умови експериментального спостереження нового фізичного явища. Воно полягає в резонансному поглинанні ВЧ-поля електронами провідності й відбувається кожного разу, коли частота радіохвилі  $\omega$  дорівнює або кратна частоті циклотронного обертання  $\Omega$  електронів у магнітному полі.

Надалі була створена повна теорія ЦР [10], що виявилася настільки вичерпною, що досі зберігає своє значення для пояснення численних

експериментальних даних. До сьогодні ЦР з об'єкта вивчення перетворився на зручний і надзвичайно результативний метод експериментального дослідження ефективних мас, довжин вільного пробігу, анізотропії швидкостей і фермі-поверхонь електронів у металах.

### 5.1.1 Фізичний механізм циклотронного резонансу

Природу та особливості ЦР можна досить просто пояснити, розглядаючи процес поглинання електромагнітного поля електронами провідності за наявності зовнішнього, постійного й однорідного магнітного поля  $H$  (вісь  $OZ$  на рис. 5.1).

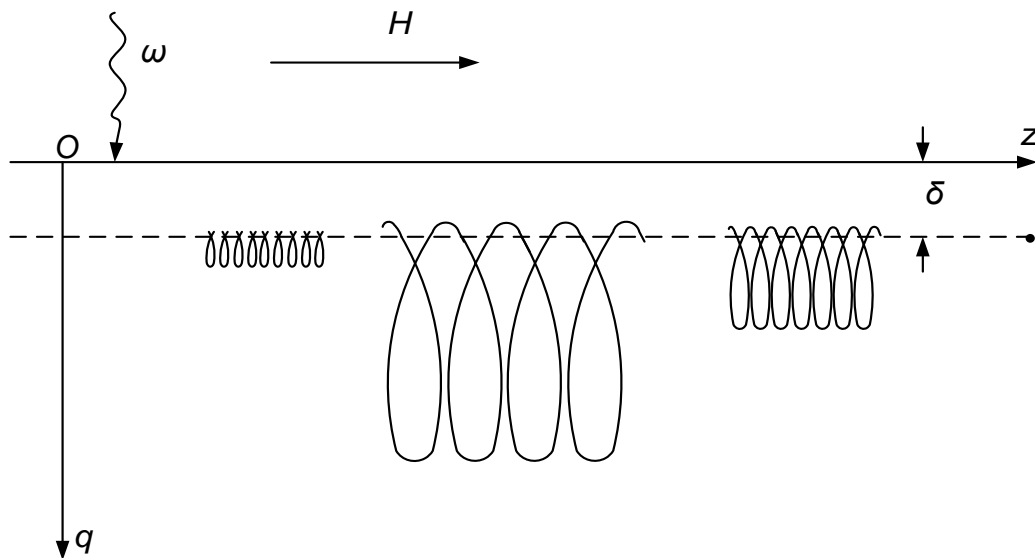


Рисунок 5.1 – Схема руху електронів у металі в умовах ЦР

Якщо радіохвиля поширюватиметься перпендикулярно до поля  $H$ , це означає, що поле  $H$  має бути паралельним до поверхні зразка, тоді умова резонансу має такий вигляд:

$$\omega = n\Omega. \quad (5.1)$$

Умова (5.1) полягає в тому, що всі електрони, які відчують колективне обертання із частотою  $\Omega$ , опиняються в резонансі із зовнішньою радіохвилею.

Механізм прискорення електронів при ЦР можна описати таким чином (рис. 5.1). У паралельній поверхні металу поля  $H$  всі електрони періодично (з частотою  $\Omega$ ) повертаються у скін-шар  $\delta$ , де відбувається їх прискорення електромагнітною хвилею. Якщо час руху електронів усередині скін-шару набагато менший від періоду хвилі  $2\pi/\omega$ , то поле радіохвилі діє на електрони як квазістатичне. Завдяки цьому при ЦР прискорення електрона відбувається на кожному витку траєкторії протягом усього часу вільного пробігу  $\tau$ . Якщо резонансну умову (5.1) порушено, то на різних витках орбіти електрон то прискорюватиметься, то сповільнюватиметься, і в середньому за час  $\tau$  (при  $\Omega\tau \gg 1$ ) взаємодія з хвилею буде неефективною. Таким чином, механізм ЦР у металах аналогічний принципу прискорення частинок у циклотроні з одним прискорювальним проміжком. Роль останнього в металі відіграє скін-шар  $\delta$ , а як дуанти (простір вільного руху) виступає область металу поза скін-шаром. Унаслідок саме такої картини резонанс (5.1) необхідно називати «циклотронним», а не «діамагнітним».

Неважко встановити і критерії для спостереження ЦР. Очевидно, що повинні виконуватись умови

$$1 \ll \Omega\tau/2\pi, \quad \varphi < \delta/l \ll 1. \quad (5.2)$$

Перша з них означає, що електрон повинен мати «можливість» багато разів ( $\Omega\tau/2\pi$  разів) повернутися в скін-шар за час вільного пробігу. Друга нерівність виражає вимогу, щоб невеликий нахил поля  $H$  на кут  $\varphi$  не призводив до проходження електронів углибину металу за рахунок дрейфового руху вздовж вектора  $H$  ( $l = v\tau$  – довжина пробігу).

Необхідно відзначити принципову відмінність ЦР у металах від відомого діамагнітного резонансу в напівпровідниках і в газорозрядній плазмі, що часто також називають циклотронним. Діамагнітний резонанс відбувається в однорідному полі радіохвилі й тому: а) спостерігається лишена основній гармонії  $\omega = \Omega$ , а не на кратних частотах (5.1); б) є максимальним при поляризації електричного поля хвилі перпендикулярно до вектора  $H$ , в той час як при ЦР у металах така залежність від поляризації

відсутня; в) характеризується різким зростанням електромагнітного поглинання в резонансі  $\omega = \Omega$ , тоді як для ЦР у металах спостерігається резонансне зменшення поглинання. Останнє пов'язане з тим, що різке збільшення електронного струму при ЦР у металі призводить до його резонансного екранування від зовнішньої радіохвилі, збільшення коефіцієнта відбиття і відповідного зменшення поглиненої в зразку електромагнітної енергії. Всі ці відмінності обумовлені ефектами сильної просторової неоднорідності ВЧ-поля в металах.

### 5.1.2 Загальні положення циклотронного резонансу в металах

1. Установлено, що чим ідеальніший провідник, тим легше перетворити його на діелектрик, тобто зробити прозорим для електромагнітних хвиль. Тим самим було поставлене фундаментальне питання про можливість поширення радіохвиль у металах.

2. Було встановлено, що проблема аномальної прозорості твердих тіл (провідників) повинна розглядатись у двох аспектах – колективному й одночастинковому. Перший із них є сукупністю власних, слабо загасальних хвиль у виродженій електронній плазмі металу. Існування проникних електромагнітних хвиль зумовлене різними колективними рухами електронної системи в зовнішніх полях. Одночастинковий аспект проблеми пов'язаний з траєкторним типом аномального проникнення (АП) радіохвиль у метали і здійснюється шляхом балістичного перенесення ВЧ-поля зі скін-шару вглибину зразка окремими, нечисленними групами електронів провідності.

3. Для існування балістичних ефектів АП необхідне виконання нерівностей

$$\delta \ll D \ll l, \quad (5.3)$$

де  $D$  – характерний розмір електронних траєкторій у магнітному полі  $H$ .

Сенс цих умов стає зрозумілим, якщо врахувати, що взаємодія електрона з хвилею найбільш інтенсивна на тих ділянках траєкторії, де він



рухається паралельно поверхні металу  $v_x = 0$  («ефективні точки»). Оскільки в полі  $H$  змінюється напрям швидкості  $v$ , на траєкторії знаходиться нескінченне число таких ефективних точок, причому очевидно, що частина з них розташована поза скін-шаром  $\delta$ . Саме це є причиною АП радіохвиль у металі. Під час руху всередині скін-шару електрон отримує приріст швидкості  $\Delta v$  і дає струм  $\Delta j = e\Delta v$ . У наступній ефективній точці, що знаходиться вглибині металу, електрон знову рухається паралельно поверхні зразка і відтворює струм  $\Delta j$ . Це і є АП балістичного типу. Умова  $\delta \ll D$  необхідна для самого існування ефективних точок, а нерівність  $D \ll l$  є вимогою відсутності зіткнень електронів між сусідніми ефективними точками.

## **5.2 Високочастотні резонансні властивості напівпровідників**

### **5.2.1 Особливості поширення електромагнітної хвилі у плазмі напівпровідника**

Поширення сильної електромагнітної хвилі у плазмі напівпровідника обумовлює ряд нових явищ, пов'язаних з нелінійностями різного роду. Одне з найбільш цікавих явищ – так званий самовплив. Суть його полягає в тому, що діелектрична проникність напівпровідника починає залежати від електричного поля. Однак діелектрична проникність, у свою чергу, визначає характер поширення електромагнітної хвилі. Хвиля, таким чином, впливає сама на себе, змінюючи умови поширення. Найбільш ефективним є тепловий самовплив, який і буде розглянуто нижче.

Газ носіїв струму (для визначеності будемо вважати їх електронами) в напівпровіднику отримує енергію від електричного поля і віддає її як ґратці при зіткненні з фононами, так і в навколишнє середовище внаслідок теплопровідності. У результаті за певних умов може встановитися стаціонарний стан, при якому середня енергія електронного газу в напівпровіднику перевищуватиме енергію ґратки і залежатиме від амплітуди електромагнітної хвилі.

Від енергії електронів залежить частота їх зіткнень із фононами і домішками. Концентрація електронів також визначається їх енергією через процеси ударної іонізації і рекомбінації. Діелектрична проникність плазми є функцією концентрації та частоти зіткнень й, отже, електромагнітного поля. Так виникає тепловий самовплив.

Тепловий самовплив виникає вже при відносно слабких електромагнітних полях. Це пов'язано із квазіпружністю зіткнень електронів із фононами. Ефективну масу акустичного фонона  $M$  можна визначити як  $T/s^2$  ( $T$  – температура ґратки,  $s$  – швидкість звуку). Проста оцінка показує, що ефективна маса електрона аж до найнижчих температур набагато менша від ефективної маси фонона. Аналогічне твердження правильне і для оптичних фононів при температурі ґратки вище дебаївської.

Як відомо, при зіткненні частинки масою  $m$  та енергією  $\varepsilon$  з нерухомою частинкою масою  $M$  нерухомій частинці передається частина енергії  $\delta\varepsilon \sim \frac{m}{M}\varepsilon$ . Оскільки у нашому випадку  $m/M \ll 1$ , то частина енергії, переданої при зіткненні електроном фонону, є малою. З іншого боку, обмін імпульсами між легкою і важкою частинками є досить інтенсивним. Таким чином, час  $\tau$ , за який електрон втрачає отриманий від зовнішнього поля імпульс, набагато менші, ніж час  $\tilde{\tau}$ , за який електрон втрачає придбану від поля енергію. Як показує розрахунок,  $\frac{\tau}{\tilde{\tau}} \sim \frac{m}{M} \ll 1$ . Звідси випливає, що енергія електронного газу в електромагнітному полі зростає набагато швидше, ніж імпульс, що призводить до сильного розігріву електронного газу у відносно слабкому електричному полі [10].

Проведений у [10] теоретичний аналіз показав, що в різних полях працюють різні механізми розсіювання. Зокрема може статися так, що залежність температури від амплітуди електричного поля буде описуватися S-подібною гістерезисною кривою. Стан електронного газу, при якому температура зменшується із зростанням поля, є нестійким. Наявність

гістерезису призводить до розриву діелектричної проникності плазми. Цей ефект може бути використаний у діагностиці плазми напівпровідників.

Одними з найбільш цікавих високочастотних властивостей напівпровідників є їх резонансні властивості, що проявляються в циклотрон-фононному резонансі (ЦФР) [10]. Електрони провідності під впливом однорідного магнітного поля  $H$  відчують циклотронне обертання з частотою  $\omega_c$ . Осцилювальний характер їх руху добре виявляється лише при малій частоті зіткнень  $\nu \ll \omega_c$ . У цьому разі рух електронів стає майже гармонічним і спостерігаються резонанси, безпосередньо пов'язані із циклотронним обертанням. На сьогодні вивчені два резонанси такого типу: циклотронний  $\omega = \omega_c$  і магнітофононний, що виникає при магнітних полях, коли частота оптичних фононів  $\omega_0$  кратна  $\omega_c$ . Природа цих явищ аналогічна, і можна сказати, що виконання резонансної умови в обох випадках забезпечує інтенсивне перекидання електронів між різними рівнями Ландау.

### **5.2.2 Плазмові нестійкості в напівпровідниках при впливі електромагнітних полів**

До сьогодні у фізиці твердих тіл сформувався підхід до вивчення електромагнітних явищ, що базується на ідеї колективної взаємодії заряджених частинок. Тим самим було покладено початок новому напрямку, який отримав назву «плазма твердого тіла» (ПТТ). Зараз час він охоплює досить широке коло фізичних явищ у системі відносно рухливих позитивно і негативно заряджених частинок, що пов'язані між собою силами кулонівського походження. Саме ці сили визначають найважливіші властивості плазми як четвертого стану речовини – екранування, квазінейтральність, колективні явища тощо.

На ідеї колективної взаємодії частинок базуються матеріальні рівняння, що пов'язують струми та змінні поля, тобто обчислення виразів для тензора діелектричної проникності плазми  $\varepsilon_{ij}(\omega, k)$ , де  $\omega$  – частота,  $k$  – хвильовий

вектор електромагнітного поля. Таким чином, плазмові ефекти значною мірою визначають електродинаміку твердих тіл– провідників.

Аналізуючи матеріальні рівняння і рівняння поля, можна отримати різного роду елементарні електромагнітні збудження (коливання або хвилі), що належать до фундаментальних понять, а їх дослідженню присвячено багато праць.

Інтерес до плазмових ефектів у твердих тілах пояснюється специфічними особливостями поведінки електронів провідності в полі кристалічної ґратки, що дозволяє вивчати їх спектр, кінетичні властивості та взаємодії. Ці відомості важливі під час виготовлення напівпровідникових та інших твердотільних матеріалів, які мають наперед задані властивості.

ПТТ важлива як матеріальний об'єкт, у якому за різних зовнішніх умов виникають і розвиваються нестійкості електромагнітних коливань. Ці стани плазми в напівпровідниках можуть використовуватися (і вже використовуються) для генерування, посилення і перетворення електромагнітних коливань у широкому інтервалі довжин хвиль – від радіочастотного до оптичного. Тому вивчення нестійкостей становить значну частину досліджень у фізиці плазми.

Численні плазмові нестійкості можна розділити на дві групи: кінетичні та гідродинамічні. Перші виникають при великій довжині вільного пробігу електронів (що значно перевищує довжину хвилі) та обумовлені резонансною взаємодією повільних хвиль з окремими групами частинок, швидкості яких близькі до фазової швидкості хвилі. Гідродинамічні нестійкості пов'язані з упорядкованим рухом макроскопічних об'ємів плазми. Розвиваються вони, як правило, в інтервалі частот, менших за частоту зіткнення електронів. Для дослідження таких нестійкостей застосовують рівняння гідродинаміки.

Характерною особливістю електронно-діркової плазми напівпровідників є відносно велике значення частоти зіткнень  $\nu$  носіїв струму з розсіювачами. Мінімальне значення зазвичай становить

$10^{11} - 10^{12} \text{ c}^{-1}$ , тому аж до інфрачервоних частот у напівпровідниках можна застосовувати гідродинамічне наближення. Іншими словами, в ПТТ найчастіше доводиться мати справу з нестійкостями гідродинамічного типу [10].

### **5.3 Ультразвукові та гіперзвукові хвилі в мікродіагностиці матеріалів**

#### **5.3.1 Особливості поширення ультразвуку в металах**

Розглянуті в попередніх розділах електронні резонанси, балістичні та колективні ефекти аномальної прозорості металів знаходять своєрідне відображення в магнітоакустичних явищах, що виникають під час поширення ультразвуку та гіперзвуку. Зв'язок між цими явищами обумовлений тим, що в основі і магнітоакустичних, і електромагнітних резонансів лежать одні й ті самі елементарні акти взаємодії електронів із хвилею. Специфіка і відмінності пов'язані з тим, що хвильовий вектор звуку  $q = \omega/s$  має певне значення, в той час як при скін-ефекті на даній частоті  $\omega$  збуджується широкий пакет хвиль із різними  $q$ .

Взаємодія електронів зі звуком (фононами) характеризується одночастинковим гамільтоніаном, вигляд якого неважко встановити за допомогою досить простих фізичних міркувань. Для цього потрібно врахувати три обставини: адіабатичність, тобто велику різницю мас електронів та іонів; наявність електричного заряду електронів провідності; незмінність електронної концентрації  $N_e$  у деформованому кристалі. Внаслідок аналізу незрівноваженості електроніву полі звукової хвилі [10] можна показати, що в зовнішньому магнітному полі  $H$  виникає додаткова, так звана індукційна взаємодія електронів зі звуком, яка зумовлена силою Лоренца, що діє з боку електронів на ґратку кристала. Його величина по відношенню до деформаційної взаємодії характеризується безрозмірним параметром  $(qR)^{-1}$  ( $R$  – циклотронний радіус електронів), значення якого може бути істотним лише в сильних полях, коли  $qR < 1$ . При цьому можна

виділити два основні різновиди резонансів: акустичний і магнітоакустичний.

1. *Акустичний циклотронний резонанс (АЦР)* – якісно аналогічний ЦР в електромагнітному полі. Характерні особливості АЦР і його відмінності від електромагнітного резонансу пов'язані з невеликим декрементом загасання звукових коливань. Легко зрозуміти фізичний механізм АЦР. Якщо хвильовий вектор  $q$  і магнітне поле  $H$  взаємно ортогональні, то середнє за період циклотронного обертання зміщення швидкості електронів уздовж вектора  $q$  дорівнює нулю. Електрон найбільш ефективно взаємодіє зі звуковим полем, коли він у відповідний момент ( $\omega = n\Omega$ ,  $n=1, 2, \dots$ ) потрапляє в площину сталої фази хвилі. Роль «скін-шару» (зазору в циклотроні) у цьому разі відіграє набігаючий фронт звукового поля. Оскільки за період прецесії  $2\pi/\Omega$  у магнітному полі електрон потрапляє в еквівалентні площини сталої фази біжучої звукової хвилі, то спостерігається резонанс. АЦР найбільш різко виражений, коли циклотронні частоти  $\Omega$  однакові для всіх електронів, тобто при квадратичному законі дисперсії. При неквадратичному спектрі, як зазвичай, «резонують» електрони з екстремальними частотами  $\Omega_{ext}$ . Вираз для відносного коефіцієнта поглинання  $\Gamma = -\text{Im } \omega/\omega$  можна подати у вигляді [10]:

$$\Gamma(H) = \Gamma_0 \frac{\Omega\tau}{\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1 + (-1)^n (\pi qR)^{-1/2} \sin(2qR - \pi/4)}{1 + (\omega - n\Omega)^2 \tau^2}, \quad (5.4)$$

де  $\Gamma_0$  – коефіцієнт поглинання при  $H = 0$ .

Резонанс відбувається в області таких магнітних полів, де величина  $qR \sim n\omega/s \gg 1$  і можна не враховувати індукційну взаємодію. АЦР проявляється у вигляді різкої резонансної модуляції геометричних осциляцій поглинання. Геометричний резонанс пов'язаний з осциляціями матричного елемента деформаційної взаємодії. При неквадратичному законі дисперсії максимуми АЦР знижуються, а їх форма стає більш складною і асиметричною.

2. *Магнітоакустичний резонанс* – резонансна залежність поглинання ультразвуку від магнітного поля в металах. Він виникає за наявності дрейфового руху електронів у напрямку хвильового вектора  $q$  (навіть при низьких частотах за  $\omega\tau \ll 1$  спостерігаються гострі максимуми сильного поглинання, розділені широкими і розмитими мінімумами слабого загасання). Цей резонанс, що має назву магнітоакустичного, спостерігається при

$$u = n \lambda, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (5.5)$$

де  $u$  – проекція зміщення електронів за циклотронний період на вектор  $q$ ;  $\lambda$  – довжина звукової хвилі.

Магнітоакустичний резонанс пов'язаний не з часовою, а з просторовою періодичністю звукового поля в металі. Він спостерігається не лише у разі перпендикулярних векторів  $q$  та  $H$ , а й при поперечному (щодо магнітного поля) поширенні ультразвуку. Для цього резонансу форма кривої поглинання має такий вигляд:

$$\Gamma(H) = \frac{\Gamma_0}{\pi\gamma} \left[ 1 + \beta \frac{(\pi\gamma)^2}{(\pi\gamma)^2 + \sin^2(\pi u/\lambda)} \right], \quad \gamma = \frac{1}{\Omega\tau} \ll 1. \quad (5.6)$$

Зокрема, на рис. 5.2 наведена типова залежність поглинання ультразвуку в олові.

Фізичний механізм магнітоакустичних резонансів пов'язаний з порушенням у металі просторово-періодичного поля. Рух електронів у магнітному полі є періодичним у часі та просторі. Якщо довжина хвилі звуку кратна характерному зміщенню орбіти електрона, виникають умови для різкої зміни поглинання і дисперсії швидкості звуку. Коли звук поширюється в напрямку, перпендикулярному до магнітного поля, то середнє зміщення електрона вздовж хвильового вектора звуку за період прецесії дорівнює нулю. При цьому в квазістатичній області частот, коли змінне поле звукової хвилі можна вважати статичним протягом часу вільного пробігу, спостерігаються осциляції, якщо діаметр циклотронної траєкторії дорівнює

цілому числу довжин хвиль звуку. Цей ефект отримав назву геометричного резонансу, або піппардівських осциляцій. За допомогою цього ефекту можна вимірювати екстремальні імпульси поверхні Фермі (ПФ) у напрямку, перпендикулярному до хвильового вектора звуку і вектора магнітного поля.

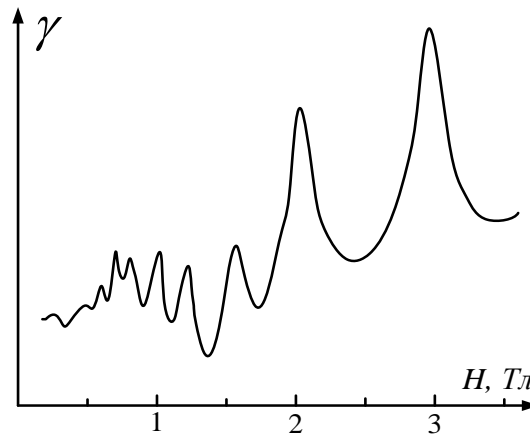


Рисунок 5.2 – Типова залежність поглинання ультразвуку в олові від магнітного поля  $H$  при частоті ультразвуку 220 МГц

Необхідно зазначити, що перші дослідження в області АЦР тамагнітоакустичного резонансу були присвячені вивченню поглинання звуку в надпровідниках. Явище надпровідності, відкрите Камерлінг-Оннесом в 1911 році, довгий час залишалося питанням, що не мало повної відповіді. Вперше мікроскопічна теорія надпровідності була побудована у працях Бардіна, Купера, Шриффера та Боголюбова лише наприкінці 50-х років минулого сторіччя. Відповідно до цієї теорії в електронному енергетичному спектрі надпровідника поблизу рівня Фермі виникає щілина. Ця щілина призводить до утворення електронних пар із протилежно спрямованими спінами й імпульсами, причому сама щілина, що виникає при  $T = T_K$ , є функцією температури і досягає свого максимального значення при 0К. Мікроскопічна теорія надпровідності зумовила експериментальні дослідження як для перевірки висновків, що випливають з теорії, так і для вимірювань конкретних параметрів реальних надпровідників, зокрема енергетичної щілини. Для її вимірювання застосовувалися методи



теплоємності, теплопровідності, критичного магнітного поля, метод зміщення  $T_K$  під впливом домішок, тунельний ефект та ін. Відомості про величину щілини можуть бути отримані при ультразвукових вимірюваннях температурної залежності поглинання ультразвуку надпровідником. Перші акустичні експерименти з вимірювання величини щілини в надпровідному олові в ІРЕ НАН України були проведені під керівництвом О. О. Галкіна. Було встановлено, що в реальному надпровіднику величина щілини залежить від орієнтації кристала, тобто щілина за своєю природою є анізотропною величиною. Анізотропія щілини в олові досягає 50%. Таким чином, уперше було встановлено, що в реальних надпровідниках існує анізотропія енергетичної щілини.

На сьогодні магнітоакустичний резонанс і АЦР виявлені в багатьох металах (олово, срібло, мідь, золото, індій, кадмій, цинк, свинець, талій, магній тощо). З їх допомогою були виміряні параметри фермі-поверхонь, ефективні маси, довжини вільного пробігу, деформаційний потенціал та анізотропія цих характеристик. Тим самим був уведений в експериментальну практику метод резонансної ультразвукової спектроскопії для вивчення енергетичного спектра і кінетичних параметрів електронів провідності в металах.

Серед магнітоакустичних досліджень металів можна виділити такі:

- 1) вивчення особливостей розміщення акустичних хвиль в умовах сильної просторової неоднорідності, коли характерний розмір траєкторії електрона в магнітному полі набагато більший за довжину хвилі звуку;
- 2) дослідження поглинання і дисперсії звукових коливань у локальній межі, коли розмір циклотронної траєкторії менший за довжину хвилі звуку;
- 3) акустичні явища у квантуючих магнітних полях;
- 4) взаємне перетворення звукових та електромагнітних хвиль нормальними металами в магнітному полі.

### 5.3.2 Особливості поширення гіперзвукових хвиль у твердому тілі

Під час використання гіперзвукових хвиль виникає питання про їх поглинання, або гіперзвукову прозорість досліджуваного твердого тіла. Адже навіть у досконалих діелектричних кристалах при відносно високих температурах (порядку температури Дебая  $\Theta$ ) гіперзвукова хвиля відчуває сильне поглинання. Так, у кристалі кварцу поглинання гіперзвуку при кімнатній температурі на частоті 10 ГГц становить  $60\text{--}70\text{ см}^{-1}$  та зростає пропорційно квадрату частоти.

Відповідно до сучасних уявлень, поглинання гіперзвуку пояснюється непружним розсіюванням на теплових фонах унаслідок енгармонізму кристалічної ґратки. При цьому характер розсіювання та поглинання істотно залежить від добутку  $\omega\tau$ , де  $\omega$  – кутова частота гіперзвуку,  $\tau$  – час релаксації взаємодіючих із ним теплових фонів. Коли  $T \sim \Theta$ ,  $\omega\tau \ll 1$ , поглинання полягає в тому, що деформація кристалічної ґратки під дією гіперзвукової хвилі змінює рівноважний розподіл фононного газу, що призводить до необоротного перенесення енергії від гіперзвукової хвилі до теплових фонів. Цей вид поглинання на частотах вище 10 ГГц є домінуючими використання гіперзвуку на таких частотах при відносно високих температурах (порядку  $\Theta$ ) стає практично неможливим. Тому високочастотний гіперзвук переважно застосовується в області низьких гелієвих температур.

Невелике поглинання гіперзвуку в діелектриках при температурі рідкого гелію створює реальну можливість для використання гіперзвуку гранично високих частот у фізичних дослідженнях. Для більш низьких частот (порядку 10 ГГц) дуже мале загасання гіперзвуку в діелектричних кристалах кварцу, сапфіра і ніобату літію, що було виявлене під час дослідження ефекту зворотності, дозволило використовувати цей ефект у практичних цілях. Так, на основі ефекту зворотності були створені кріогенні гіперзвукові лінії затримки сигналів НВЧ у сантиметровому радіодіапазоні з рекордно тривалим запам'ятовуванням електромагнітного сигналу [10].

Гіперзвукова хвиля, що поширюється в кристалі з парамагнітними центрами, відчуває резонансне поглинання. Цей ефект має схожість із електронним парамагнітним резонансом (ЕПР) і його прийнято називати акустичним парамагнітним резонансом (АПР). Як і при ЕПР, резонансне поглинання гіперзвуку відбувається в умовах, коли частота пружних коливань у хвилі збігається із частотою переходу між рівнями, що належать парамагнітному центру. Однак АПР істотно відрізняється від ЕПР тим, що за резонансне поглинання гіперзвуку відповідальна не магніtodипольна, як у випадку ЕПР, а фононна взаємодія. Правила відбору дозволених переходів, що визначаються цією взаємодією, дозволяють спостерігати АПР у тих випадках, коли магніtodипольні переходи, з якими пов'язаний ЕПР, заборонені. Тому АПР є більш інформативним порівнянно з ЕПР методом і дозволяє отримувати прямі й точні відомості про структуру енергетичного спектра домішкового парамагнітного центру та його взаємодії з пружними коливаннями кристалічної ґратки.

Дослідження методом АПР електрон-фононної взаємодії привели до виявлення фазерних явищ посилення і генерації когерентних гіперзвукових хвиль при стимульованому випромінюванні парамагнітних центрів у кристалах. Ці явища подібні лазерним (звідси і термін «фазер») [10].

## **5.4 Практична реалізація резонансних явищ у мікродіагностиці твердих тіл та плазми**

### **5.4.1 Метод ЦР-спектроскопії для визначення енергетичного спектра та кінетики електронів на фермі-поверхні**

Циклотронний резонанс зазвичай виявляється залежністю поверхневого імпедансу  $Z$  від поля  $H$  при фіксованій частоті  $\omega$ . Для металу з квадратичним законом дисперсії

$$Z(H) = A|Z(0)| \left[ 1 - \exp\left(\frac{2\pi i \omega}{\Omega} - \frac{2\pi}{\Omega \tau}\right) \right]^{1/3} \exp\left(-\frac{\pi i}{3}\right), \quad (5.7)$$

де  $A \approx 1$  – функція, що повільно змінюється із  $H$ .

Із (5.7) бачимо, що в умовах (5.1) та (5.2) різко зменшуються дійсна та уявна частини імпедансу, що продемонстровано на рис. 5.3.

Резонансні мінімуми імпедансу періодичні у функції зворотного поля, а їх ширина визначається частотою електронної релаксації  $1/\tau$ . У лужних (ізотропних) металах відсутня анізотропія  $Z(H)$  як щодо поляризації хвилі, так і відносно орієнтації вектора  $H$  до осей кристала (у площині зразка). Форма ліній ЦР асиметрична.

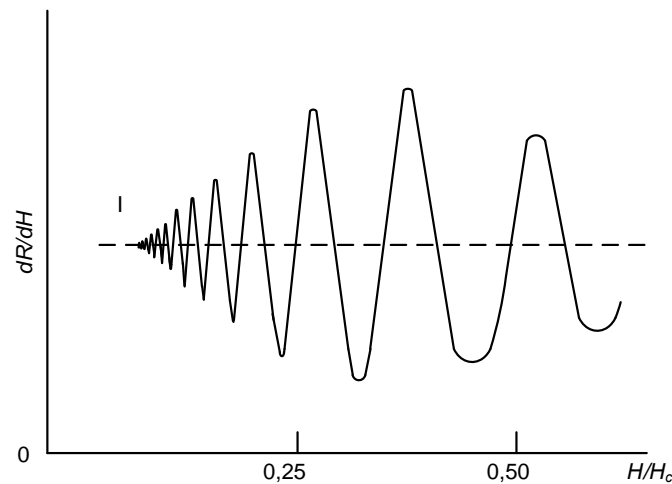


Рисунок 5.3 – Графіки для похідної дійсної частини поверхневого імпедансу щодо поля  $H$ ,  $dR/dH$  від магнітного поля ( $H_c$  – поле основного резонансу в  $Cu$ , частота 24 ГГц,  $T = 4K$ ,  $\omega\tau = 10$ ) [10]

При неквадратичному законі дисперсії електронів, характерному для більшості металів, циклотронна частота  $\Omega$  залежить від  $p_z$ , тобто неоднакова у різних електронів. У цьому разі резонанс відбувається на екстремальних частотах  $\Omega_{ext}$ , оскільки для електронів із такими значеннями  $\Omega$  характерна особливість у щільності станів з даним значенням циклотронної частоти. Завдяки зменшенню числа резонансних частинок амплітуда ЦР зменшується, лінії розширюються і стають більш асиметричними порівняно з випадком  $\Omega(p_z) = const$ . При цьому ЦР на

електронах центрального перерізу  $p_z = 0$  та з околу опорної точки  $|p_z| = p_{max}$  на поверхні Фермі виявляється чутливою до напрямку поляризації ВЧ-струму. Всі ці висновки повністю підтвердилися в експериментах і теорії, що дозволяє шляхом аналізу залежностей, поданих на рис. 5.3, визначати енергетичний спектр і кінетику електронів у металах.

#### 5.4.2 Метод відсікання циклотронних резонансів у пластині для визначення діаметрів електронних орбіт та їх анізотропії

У тонкій плоскопаралельній металевій пластинці, товщина якої  $d$  значно менша за довжину вільного пробігу  $l$  електронів відносно їх розсіювання в об'ємі, ЦР має низку особливостей (рис. 5.4). Якщо при зіткненні з гранями пластини електрони відбиваються дифузно, то в ЦР можуть брати участь лише ті з них, у яких діаметр орбіти  $D$  менший за товщину  $d$ . Діаметр  $D$  залежить від магнітного поля  $H$  і розміру електронної траєкторії  $\Delta p$  в  $p$ -просторі:

$$D = \frac{c|\Delta p_y|}{eH}. \quad (5.8)$$

При змінюванні величини  $H$  обов'язково виникає ситуація, при якій максимальний діаметр  $D_{max}$  (у загальному випадку  $-D_{ext}$ ) дорівнюватиме  $d$ :

$$D_{ext} = d, \quad (5.9)$$

тобто частина електронних траєкторій почне (або перестане) повністю поміщатися всередині пластини. При цьому значенні  $H = H_c$  (поле відсічення) повинна виникнути особливість залежності імпедансу від  $H$ , оскільки електронні орбіти, що відсікаються, не дають вкладу в резонанс (вони «виходять із гри»). В ізотропному металі

$$Z_{\perp, \square}(d) = Z(\infty) \left[ \frac{2\varphi_0 \pm \sin 2\varphi_0}{\pi} \right]^{-1/3}, \quad \varphi_0 = \arcsin \frac{d}{D_0}. \quad (5.10)$$

Тут  $Z(\infty)$  визначається формулою (5.7), знаки  $\perp$  та  $\square$  позначають поляризацію ВЧ-струму впоперек і вздовж постійного поля  $H$ .

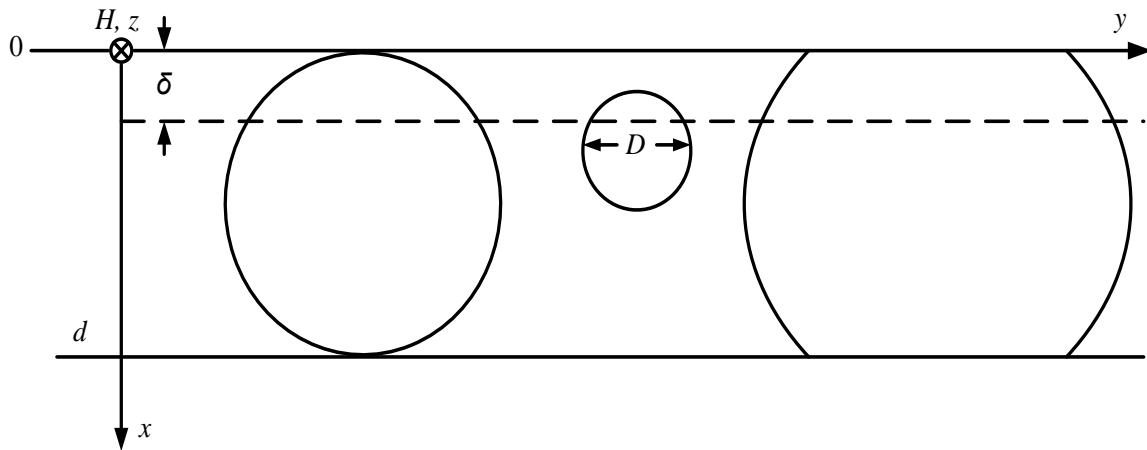


Рисунок 5.4 – Проекції електронних траєкторій на площину, перпендикулярну до вектора  $H$ , всередині плоскопаралельної металевої пластини товщини  $d$  ( $H \perp O_z$ , нормаль до граней  $-O_x$ )

Із (5.10) випливає, що величина  $Z_{\perp}$  при  $H = H_c$  відчуває злам, а  $Z_{\square}$  неперервна з першими двома похідними по  $H$ . За допомогою спостереження цього розмірного ефекту можна експериментально визначити екстремальні діаметри електронних орбіт  $\Delta p_y$  та їх анізотропію.

У полях, менших  $H_c$ , частина орбіт відсікається гранями пластини через дифузійне розсіяння електронів. Тому при неквадратичному законі дисперсії, коли ЦР обумовлений невеликою групою електронних станів з екстремальними частотами  $\Omega_{ext}$ , у полі  $H_c$  будуть відсікатися гармоніки резонансу від електронів, чії орбіти не поміщаються всередині зразка.

### 5.4.3 Взаємне перетворення електромагнітних і звукових хвиль у нормальному металі

Оскільки електронна система в провідниках незамкнена відносно ґратки та електромагнітних полів, то можливий резонансний режим зв'язування колективних електромагнітних мод електронно-діркової плазми провідника

(або напівпровідника) з акустичними коливаннями ґратки. Незамкненість системи носіїв заряду призводить до електромагнітної генерації акустичної хвилі. У цьому режимі в металі поширюється акустична хвиля, збуджена зовнішнім електромагнітним полем. Можливий і зворотний процес – коли акустичне збудження електромагнітної хвилі дозволяє створити в об’ємі металу електромагнітні поля значної інтенсивності, існування яких на значних відстанях від поверхні металу обумовлене перетворенням (трансформацією) акустичної хвилі в електромагнітну.

Експериментальні та теоретичні дослідження взаємного перетворення хвиль у нелокальній межі (сильної просторової дисперсії),  $|k|l \gg 1$  та  $\delta l \gg 1$ , де  $k$  – хвильовий вектор електромагнітної або акустичної хвилі;  $\delta$  – глибина скін-шару;  $l$  – довжина вільного пробігу носіїв заряду, становлять особливий інтерес, оскільки в цих умовах одночасно можуть виявитися різні електромагнітні та магнітоакустичні ефекти. Вивчення різних ефектів у режимі перетворення дає широку інформацію як про енергетичні характеристики квазічастинок, так і про спектр, і про дисипативні властивості колективних електромагнітних мод плазми в металі.

Експериментальні дослідження перетворення хвиль у металах в області гіперзвукових частот дають можливість вивчити різні фізичні явища, що потребують виконання умов  $\omega\tau > 1$  і  $\omega\tau \gg 1$ , де  $\tau$  – час релаксації (для нормальних металів при гелієвих температурах  $\tau \sim 10^{-8} \div 10^{-9}$  с), і дозволяють вирішити проблему збудження і реєстрації гіперзвуку в металах, оскільки ефективність стандартних п’єзоперетворювачів падає з підвищенням частоти. Безконтактний метод збудження є єдино можливим методом дослідження поляризаційних явищ, оскільки дозволяє в умовах одного дослідження змінювати поляризацію збуджуваного і реєстрованого звуків. Відзначимо, що такі дослідження поляризаційних ефектів трансформації дають додаткову інформацію про механізми трансформації, характеристики електромагнітних і магнітоакустичних збуджень. Важливість таких досліджень пояснюється

практичним застосуванням їх результатів під час створення різних пристроїв акустoeлектроніки, засобів безконтактного контролю та передавання інформації.

Як приклад досліджень трансформації розглянемо вольфрам. Вибір цього металу обумовлений такими обставинами [10]. У ньому виявлені різноманітні магнітоакустичні ефекти в нормальному до поверхні металу магнітному полі, пов'язані з великою довжиною пробігу електронів та складним законом дисперсії квазічастинок.

Високочастотна трансформація хвиль досліджувалася методикою «роботи на прохід» (рис. 5.5), коли на одному боці зразка вольфраму збуджувався або реєструвався акустичний сигнал, а на іншому – електромагнітний. Усі вимірювання проводилися на частотах 20–400 МГц у режимі безперервних коливань в геометрії  $k \perp H$ . Експериментальні дані не залежали від напрямку трансформації при відповідному напрямку магнітного поля.

Сигнал трансформації в усіх експериментах при  $H = 0$  на частотах  $\omega/2\pi \approx 100$  МГц упевнено реєструвався на рівні 15 – 20 дБ/Вт вище межі чутливості приймального тракту. Оцінки коефіцієнта трансформації при  $H = 0$  дають значення  $\gamma \sim 10^{-4} - 10^{-5}$  для  $\omega/2\pi \approx 100$  МГц, товщини зразка  $d = 2$  мм,  $T = 4,2$  К.

Експериментально виявлена нелокальна трансформація зумовила побудову теорії трансформації для пластини металу [10], а більшість експериментальних результатів використані під час вивчення механізмів трансформації в різних металах.



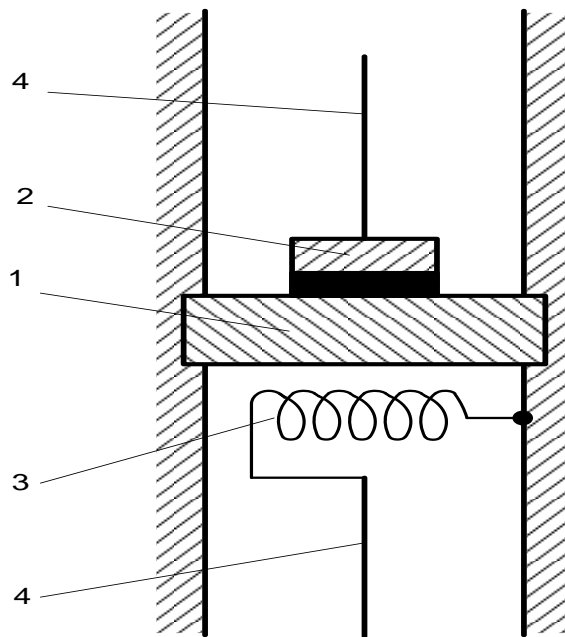


Рисунок 5.5 – Схема перетворювача акустичних та електромагнітних хвиль металами [10]: 1 – зразок; 2 – п'єзоперетворювач; 3 – електромагнітний контур; 4 – коаксіальні лінії передавання енергії

#### 5.4.4 Збудження, трансляція і детектування високочастотного гіперзвуку

Використання гіперзвукових хвиль із частотами вище 10 ГГц значною мірою пов'язане з розробленням ефективних методів збудження, трансляції та детектування. Для збудження гіперзвуку п'єзокристал поміщають в електромагнітне поле, яке викликає в ньому пружні деформації, що служать джерелом об'ємних гіперзвукових хвиль. Унаслідок лінійності п'єзоефекту поширення гіперзвуку в такому кристалі приводить до збудження електромагнітного поля. Причому внаслідок дуже малої довжини хвилі гіперзвуку збудження його, як і зворотне перетворення в електромагнітне поле (детектування), відбувається поблизу граничних площин п'єзокристалу. Ефективність трансформації електромагнітного поля в гіперзвук і його детектування характеризується коефіцієнтом подвійного перетворення  $\eta$ , який визначається як відношення потужності електромагнітної хвилі,

породженої гіперзвуком, до потужності тієї самої хвилі, яка порушила його в кристалі. Для коефіцієнта подвійного перетворення можна записати вираз

$$\eta \sim \chi^2 p \left( \frac{k_e}{k_s} \right)^2, \quad (5.11)$$

де  $\chi$  – коефіцієнт електромеханічного зв'язку;  $k_e$ ,  $k_s$  – хвильові вектори електромагнітної і гіперзвукової хвиль;  $p$  – фактор, що враховує ослаблення ефекту зворотного перетворення за рахунок відхилення від паралельності фазового фронту гіперзвукової хвилі площині детектування.

Оскільки  $k_e \ll k_s$ , то умови поширення електромагнітної і гіперзвукової хвиль у кристалі сильно «неузгоджені». Тому лише невелика частина потужності електромагнітної хвилі витрачається на збудження гіперзвуку, переважна її частина фактично відбивається від п'єзокристалу. Внаслідок цього мала і величина коефіцієнта подвійного перетворення. На низьких частотах можна збільшити  $\eta$  шляхом використання при збудженні гіперзвуку об'ємного резонатора і забезпечити в міру його добротності багаторазову взаємодію електромагнітної хвилі з п'єзокристалом, однак зі збільшенням частоти добротність резонатора падає, і такий спосіб виявляється неефективним.

Одним із ефективних методів збудження і детектування гіперзвуку з частотами порядку  $10^{11}$  Гц є застосування сповільненої електромагнітної хвилі, що поширюється у граничній площині п'єзокристалу. Внаслідок уповільнення хвильовий вектор електромагнітної хвилі збільшується і це дозволяє істотно підвищити ефективність трансформації електромагнітного поля в гіперзвук. При збудженні гіперзвуку цим способом у граничній площині п'єзокристалу розміщується хвилевідна періодична структура (рис. 5.6), за допомогою якої формується поле поверхневої сповільненої електромагнітної хвилі. На поверхні п'єзокристалу воно перетворюється в об'ємні гіперзвукові хвилі, що поширюються в напрямку, який становить невеликий кут (порядку  $k_e/k_s$ ) по відношенню до нормалі. Збуджені

гіперзвукові хвилі (рис. 5.6) «запам'ятовують» структуру електромагнітного поля поверхневої сповільненої хвилі. Тому для зворотного перетворення гіперзвуку необхідно застосувати точно таку саму електродинамічну систему або використовувати одну і ту саму систему як для збудження, так і для детектування гіперзвуку. Таким способом у кварці при температурі рідкого гелію були збуджені поздовжні й поперечні гіперзвукові хвилі на частотах 40 і 75 ГГц [10].

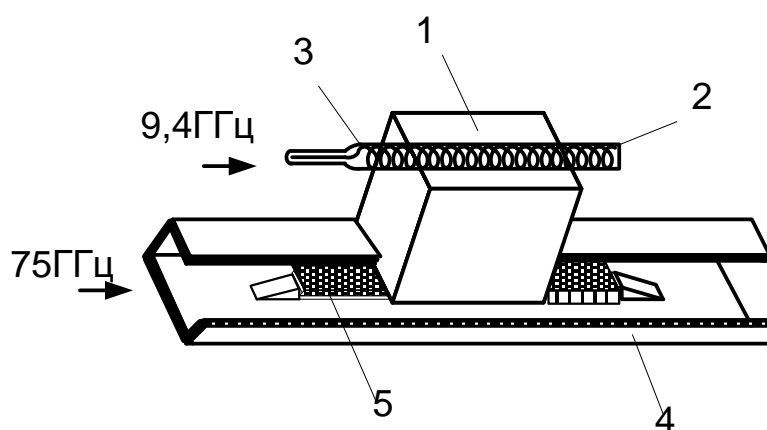


Рисунок 5.6 – Схема пристрою для збудження гіперзвуку в кварці на частотах 9,4 і 75 ГГц: 1 – кварцова призма; 2 – сповільнювальна спіраль; 3 – рупор для збудження спіралі; 4 – 4-міліметровий хвилевід; 5 – сповільнювальна система типу «гребінка»

Оскільки хвильові періодичні структури, необхідні для уповільнення електромагнітної хвилі, можуть бути реалізовані на частотах, що охоплюють практично весь міліметровий радіодіапазон, метод сповільненої хвилі дозволяє досягти частот гіперзвуку порядку  $10^{11}$  Гц, однак його застосування обмежене не досить досконалими п'єзoeлектричними кристалами.

Ефективно збуджувати й детектувати гіперзвукові хвилі з високими частотами можна і способом «точкового» перетворення електромагнітного поля [10]. Він базується на такому. Оскільки величина  $\eta$  визначається головним чином відношенням  $k_e/k_s$ , то істотне (набагато порядків)

збільшення  $\eta$  можна отримати, якщо створити електромагнітне поле з такою структурою, в якій домінує просторова гармоніка із хвильовим вектором, за величиною близькою до хвильового вектора гіперзвуку. Виявилось, що це можливо, якщо сконцентрувати електричне поле НВЧ у дуже малому об'ємі на торці встановленої в хвилеводі й електрично узгодженої з ним тонкої металевої голки. Гіперзвукова антена-випромінювач (приймальна антена) для «точкового» перетворення є нанесеною на кристал текстурованою п'єзоелектричною плівкою з окису цинку з металевим підшаром, в якому за допомогою голки концентрується електричне НВЧ-поле. Товщина п'єзоелектричної плівки обирають такою, що дорівнює половині довжини хвилі гіперзвуку, тому якщо розкласти функцію розподілу сконцентрованого в ній електричного поля в інтеграл по плоских хвилях, то хвиля з  $k_e \sim k_s$  виявиться домінуючою. Внаслідок цього при «точковому» перетворенні досягається висока ефективність. На частоті близько 10 ГГц  $\eta \sim 10^{-3} - 10^{-4}$ .

Хоча метод «точкового» перетворення і поступається способу сповільненої поверхневої електромагнітної хвилі за досяжними частотам гіперзвуку, проте він дозволяє досить ефективно збуджувати гіперзвук у міліметровому радіодіапазоні [10].

#### **5.4.5 Експериментальна установка для досліджень взаємодії електронного пучка з плазовими коливаннями в напівпровіднику**

Взаємодія пучка з плазовими коливаннями експериментально досліджувалася в германії та антимоніді індію [10].

Взаємодія пучка зі зразком вивчалася на установці, схема якої подана на рис. 5.7. Стрічковий пучок електронів, що має переріз  $0,4 \times 3,5 \text{ мм}^2$ , фокусувався магнітним полем. Для прискорення застосовувалося джерело імпульсної напруги зі змінною тривалістю імпульсу (від 0,2 до 100 мкс). Зразок InSb мав форму прямокутної пластини довжиною 6 мм, товщиною  $d = 2,5 \text{ мм}$ , шириною 3,5 мм і клиноподібними зрізами для узгодження з

хвилевідним трактом. Як генератори використовувалися лампи зворотної хвилі, що працювали в діапазонах 12,5 і 1,5 мм в імпульсному режимі (тривалість імпульсу генератора була дещо більшою за імпульс прискорювальної напруги).

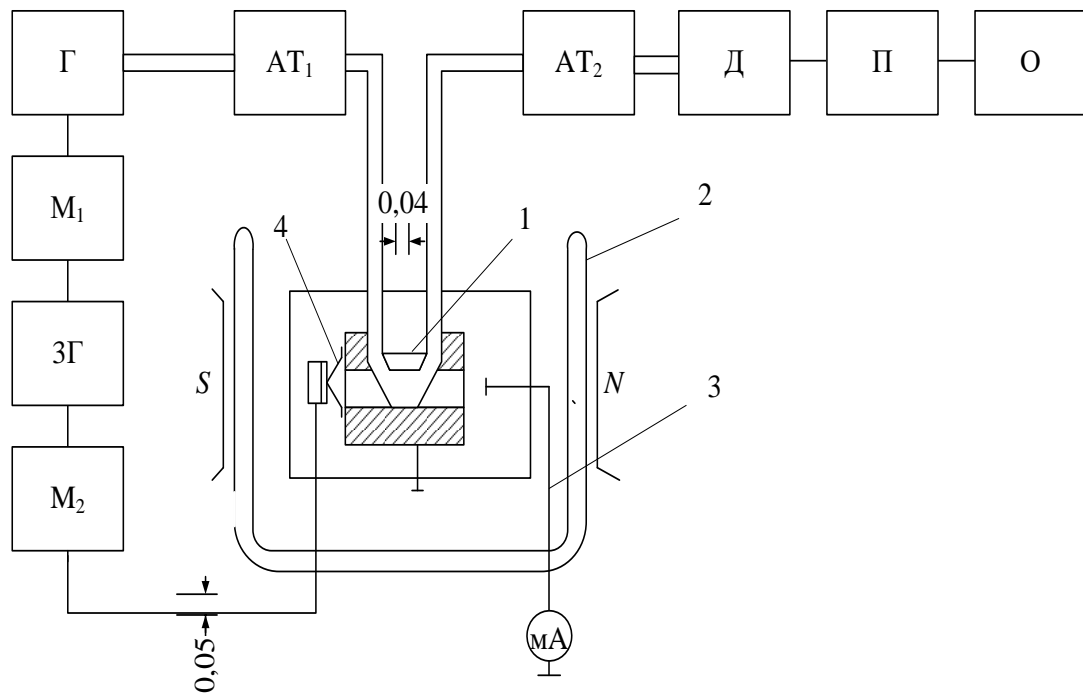


Рисунок 5.7 – Схема установки: Г – генератор; АТ<sub>1,2</sub> – атенюатори; М<sub>1,2</sub> – модулятори; Д – детектор; П – підсилювач; О – осцилограф; 1 – зразок; 2 – посудина Дьюара; 3 – колектор; 4 – електронна гармата

На рис. 5.8 наведені залежності приросту потужності  $\Delta P$  від напруги і струму в пучку для резонансної довжини хвилі  $\lambda = 2,3$  мм.

Величина  $\Delta P$  є різницею потужності на виході установки за наявності пучка і потужності  $P_0$  за її відсутності. При малих  $\Delta P/P_0$  це відношення пропорційне інкременту зростання. Спостерігалось монотонне збільшення  $\Delta P$  зі зростанням напруги та струму пучка, що можна пояснити його кінцевими розмірами при взаємодії з квазіпотенціальними коливаннями в сильному магнітному полі.

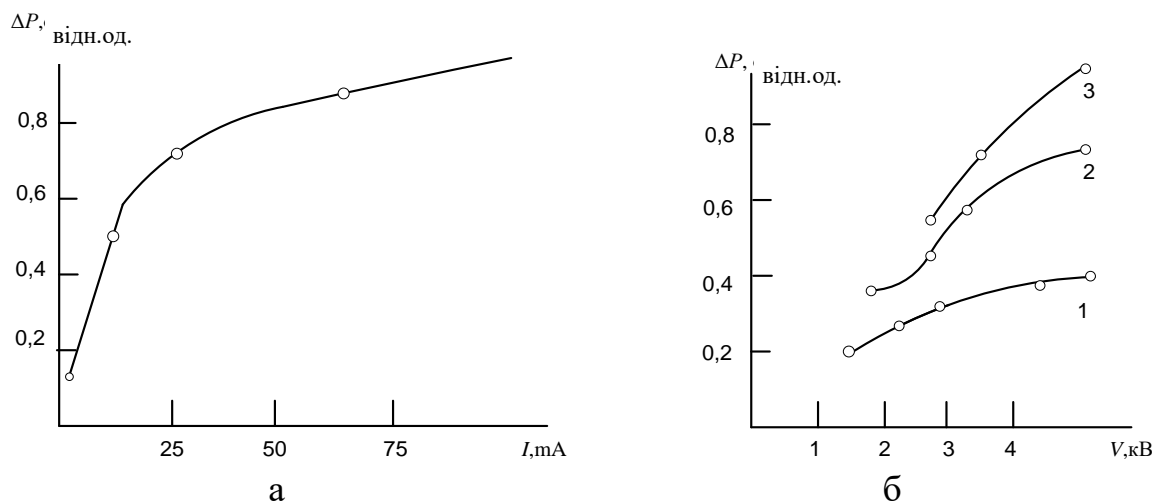


Рисунок 5.8 – Залежності  $\Delta P$ : а – від струму в пучку при  $V = 4$  кВ, б – від прискорювальної напруги при різних  $I$  (мА): 1 – 90; 2 – 120, 3 – 200

#### 5.4.6 Вимірювання властивостей плазми в міліметровому і субміліметровому діапазонах хвиль

В установках для дослідження керованого термоядерного синтезу, таких як Токамак, за допомогою електричного розряду утворюється газова плазма, що протягом деякого часу утримується магнітним полем. Важливими характеристиками такої нестаціонарної плазми є залежності від часу концентрації електронів і частоти зіткнень електронів з важкими частинками. Їх можна визначити радіофізичним методом за допомогою інтерферометра міліметрового діапазону хвиль.

Принцип вимірювань з використанням явища інтерференції базується на дослідженні характеристик зондувальної хвилі, що пройшла крізь шар плазми, і в порівнянні з проходженням цієї хвилі у вільному просторі. Зміна характеристик зондувальної хвилі функціонально пов'язана з властивостями плазми. Метод вимірювання полягає у визначенні за допомогою інтерферометра зсуву фаз та ослаблення зондувальної хвилі, що проходить крізь шар плазми протягом її утворення та розпаду, і в обчисленні за цими параметрами середніх концентрацій електронів і частоти зіткнень електронів як функції часу.

До вимірювальних інтерферометрів, призначених для діагностики плазми, виставляється ряд вимог щодо діапазону вимірювання, швидкодії, точності, стійкості до вібрацій, стабільності в часі тощо. Ці вимоги задовольняють хвильові гетеродинні інтерферометри [9, 10]. Вони характеризуються високою чутливістю, широким діапазоном вимірювання, малими похибками, високою стабільністю в часі. Принцип дії гетеродинного інтерферометра полягає у перенесенні вимірювання зсуву фаз та ослаблення із надвисокої частоти на більш низьку проміжну частоту. Спрощена схема плазмової установки наведена на рис. 5.9.

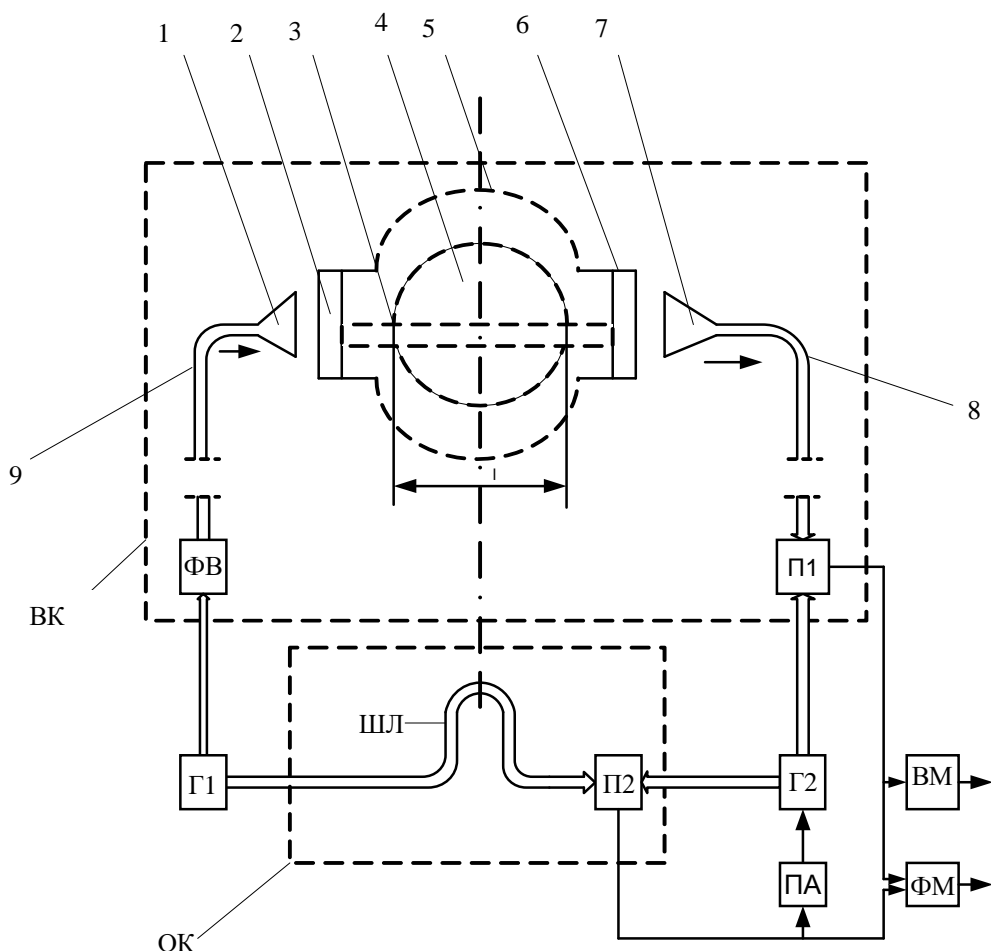


Рисунок 5.9 – Загальна схема плазмової установки з гетеродинним інтерферометром

Металева камера 5 містить плазмовий об'єм 4 у формі тора, показаний у поперечному розрізі діаметру кола  $l$ , що утворює коло тора. Хвильовий пучок 3 формується передавальною антеною 1, а після проходження крізь плазму і вікна 2, 6, прозорі для випромінювання міліметрового діапазону, приймається антеною 7. Потужність випромінювання каналізується хвилевідною системою 8, 9.

Вимірювальна частина інтерферометра містить генератор  $\Gamma_1$  частоти  $f_1$ , гетеродин  $\Gamma_2$  частоти  $f_2$ , вимірювальний канал (ВК) та опорний канал (ОК). Потужність хвилі генератора  $\Gamma_1$  розділяється на дві частини і по ВК надходить до приймача  $\Pi_1$ , а по ОК – до гетеродинного приймача  $\Pi_2$ . Потужність хвилі гетеродина  $\Gamma_2$  також ділиться на дві частини, що надходять до приймачів  $\Pi_1$  і  $\Pi_2$ . Сигнал проміжної частоти (ПЧ) з виходу підсилювача проміжної частоти (ППЧ) приймача  $\Pi_1$ , що несе інформацію про фазу і про амплітуду зондувальної хвилі, надходить на фазометр (ФМ) і мілівольтметр (МВ). Сигнал ПЧ із виходу ППЧ приймача  $\Pi_2$ , що несе інформацію про фазу і про амплітуду опорної хвилі, подається на ФМ і на схему автоматичного підстроювання частоти (АПЧ) гетеродина  $\Gamma_2$ . Схема АПЧ використовується для забезпечення сталого значення ПЧ. Вимірювальні сигнали з виходу ФМ та МВ передаються в систему реєстрації та обробки.

З метою зниження загасання потужності у ВК, довжина якого може досягати 10–20 м, хвилеводи 8, 9 виконані з труб підвищеного перерізу. Завдяки цьому збільшується динамічний діапазон вимірювань. Хвилевідний шлейф (ШЛ) необхідний для зрівнювання дисперсії хвилі ОК з ВК. В результаті виключається похибка вимірювання зсуву фаз через нестабільність частоти та паразитної модуляції генератора  $\Gamma_1$ . Антени 1, 7 призначені для зменшення кута розходження зондувального пучка і зниження загасання його енергії.

Для визначення концентрації електронів гарячої плазми в експериментах із керованого термоядерного синтезу раніше застосовувались інтерферометри міліметрового діапазону радіохвиль. На сьогодні вже



створені інтерферометри, що працюють на менших довжинах радіохвиль, тобто на хвилях субміліметрового діапазону. Метод вимірювання властивостей плазми при цьому в принципі виявляється таким самим, але засоби вимірювання істотно змінюються у зв'язку з використанням квазіоптичних методів [10].

## **5.5 Теми практичних (семінарських) занять та контрольні питання до розділу 5**

### **Теми практичних (семінарських) занять**

1. Метод ЦР спектроскопії та його реалізація.
2. Метод відсікання ЦР в тонкій пластині.
3. Взаємне перетворення електромагнітних і звукових хвиль в нормальному металі. Схема перетворювача акустичних та електромагнітних хвиль.
4. Збудження, трансляція і детектування високочастотного гіперзвуку. Схеми пристроїв для хвильового і «точкового» збудження гіперзвуку.
5. Експериментальна установка для дослідження взаємодії електронного пучка з плазмою в напівпровіднику.
6. Вимірювання властивостей плазми в міліметровому і субміліметровому діапазонах хвиль.

### **Контрольні питання**

1. Які основні методи мікродіагностики твердих тіл вам відомі? Перелічіть їх та дайте коротку характеристику.
2. У чому полягає механізм циклотронного резонансу (ЦР) у металах? Сформулюйте загальні положення ЦР у металах.
3. У чому проявляється нелінійність фізичних явищ при аномальному скін-ефекті? Сформулюйте основні особливості цього ефекту.

4. У чому полягають особливості поширення електромагнітної хвилі в плазмі напівпровідника? Поясніть фізику самовпливу електромагнітних хвиль у плазмі напівпровідника.

5. За яких умов у напівпровіднику виникають циклотронний резонанс та плазмові нестійкості при впливі електромагнітних полів?

6. У чому полягають особливості поширення ультразвуку в металах? Сформулюйте основні положення акустичного, магнітоакустичного та геометричного циклотронних резонансів у металах.

7. Які основні властивості гіперзвуку використовуються примікродіагностиці твердих тіл?

8. У чому полягає явище акустичного парамагнітного резонансу? Поясніть його відмінність від електронного парамагнітного резонансу.

9. Яким чином метод ЦР-спектроскопії використовується для визначення енергетичного спектра і кінетики електронів на фермі поверхні металів?

10. Яким чином використовується ефект відсікання ЦР у пластині для визначення екстремальних діаметрів електронних орбіт та їх анізотропії?

11. У чому полягає фізика взаємного перетворення електромагнітних і звукових хвиль нормальними металами? Наведіть приклад виконання схеми перетворення акустичних і електромагнітних хвиль металами.

12. Якою величиною характеризується ефективність трансформації електромагнітного поля в гіперзвук? Проаналізуйте чинники, що впливають на коефіцієнт подвійного перетворення.

13. У чому полягає метод сповільненої електромагнітної хвилі при збудженні та детектуванні височастотного гіперзвуку? Наведіть схему його реалізації.

14. У чому полягає спосіб «точкового» перетворення електромагнітного поля в гіперзвук?

15. Якимчином можна експериментально дослідити взаємодію електронного пучка з плазовими коливаннями в напівпровіднику? Наведіть схему такої установки.

16. У чому полягає принцип дії гетеродинного інтерферометра? Опишіть схему інтерферометра міліметрового діапазону хвиль.

17. У чому відмінність інтерферометрів міліметрового та субміліметрового діапазонів хвиль?

## **6. АПАРАТУРНІ КОМПЛЕКСИ НОВИХ НАПРЯМІВ ДІАГНОСТИКИ МІКРО- І НАНОРОЗМІРНИХ ОБ'ЄКТІВ**

Проведення досліджень різних властивостей матеріалів та об'єктів, структурованих у мікро- і нанорозмірних масштабах та їх діагностика є одним із пріоритетних напрямків сучасної науки та техніки. У зв'язку з цим стоїть завдання створення нових видів апаратурних комплексів (АК) і методів, які могли б забезпечити проведення як аналізу мікроструктури, так і елементного складу нових наноматеріалів і нанооб'єктів. Серед широкого різноманіття фізичних принципів, на основі яких розробляються нові АК, останнім часом особлива увага приділяється сфокусованим пучкам заряджених частинок і мікрохвильовій НВЧ-діагностиці. У першому випадку це пов'язано з тим, що нижня межа розмірів сфокусованого пучка лежить у нанометровому і суб-нанометровому діапазонах [11]. Тому за рахунок детектування продуктів взаємодії частинок пучка з речовиною можна отримувати інформацію про мікроструктурний та елементний склад досліджуваних об'єктів. Аналогічну інформацію можна отримати за допомогою ближньопольової НВЧ-діагностики з досягненням просторової роздільної здатності порядку 100 нм шляхом застосування більш простих у технічному виконанні АК [16].

### **6.1 Сфокусовані пучки заряджених частинок у діагностиці матеріалів**

Апаратурні комплекси, що базується на сфокусованих електронних пучках, втілені в растрових (SEM – scanning electron microscope) і трансмісійних електронних мікроскопах (ТЕМ – transmission electron microscope), а також у комплексах електронно-пучкової літографії (EPL – electron probe lithography) [13, 15]. Процеси формування пучків тут досить добре вивчені та ґрунтуються на аксіально-симетричних зондоформувальних системах. Напрямок поліпшення параметрів комплексів пов'язаний із застосуванням різних типів мультипільних коректорів аберацій і

енергетичних фільтрів. На базі цих апаратурних комплексів розвинені методи електронного зондового мікроаналізу (EPMA – electron probe microanalyzer) структури й елементного складу досліджуваних зразків: енерго-дисперсійна (EDS – energy dispersive spectrometer) і хвильова дисперсійна (WDS – wavelength dispersive spectrometer) спектроскопії, оже-електронна мікроскопія, спектроскопія енергетичних втрат електронів (EELS – electron energy loss spectroscopy), зображення Z-контрасту та ін. Поряд із дуже високою роздільною здатністю (для деяких методів роздільна здатність знаходиться на атомарному рівні) існують принципові фізичні обмеження, пов'язані з особливостями електронних пучків. Сильне розсіювання електронів пучка на атомарних електронах досліджуваних об'єктів призводить до необхідності застосування тонких зразків для збереження просторової роздільної здатності та чутливості, що викликає певні питання до репрезентативності таких зразків реальним матеріалам. У разі реєстрації характеристичного рентгенівського випромінювання індукованого електронним пучком (EDS, WDS) утворюється високий гальмівний фон, який знижує чутливість мікроаналізу.

#### **6.1.1 Ядерний сканувальний мікрозонд**

До одних із порівняно нових АК, призначених для досліджень структури й елементного складу зразків, належить ядерний сканувальний мікрозонд (ЯСМЗ), у якому використовується сфокусований пучок легких іонів (іонів водню або гелію) з енергією кількох мегавольтів (MeV) [12]. Просторова роздільна здатність у ЯСМЗ визначається розмірами зонда на поверхні зразка, а чутливість мікроаналізу ряду ядерно-фізичних методів знаходиться на рівні 1 ppm. Це дозволяє досліджувати приповерхні шари товстих зразків без зменшення просторового вирішення та чутливості. За свою 40-річну історію ЯСМЗ знайшов широке застосування в різних напрямках досліджень: у матеріалознавстві, мікроелектроніці, геології,

ботаніці, біофізиці та медицині, археології та дослідженні предметів мистецтва, навколишнього середовища, мікроімплантації та ін.

В основі ядерного сканувального мікрозонда лежить ряд пристроїв і систем, що базуються на різних фізичних принципах. На рис. 6.1 наведена ілюстрація традиційної схеми розміщення основних елементів мікрозонда. Тут пучок іонів створюється, як правило, за допомогою плазмового джерела іонів. Прискорення пучка до необхідної енергії в кілька мегавольтів здійснюється в прискорювальній структурі електростатичного прискорювача. Для вибору певного сорту іонів застосовується аналізуючий магніт із щільним пристроєм на виході. Формування пучка в ЯСМЗ проводиться за допомогою керуючих електромагнітних полів. Сама система, що забезпечує формування пучка в зонд, називається зондоформувальною системою (ЗФС). Тут попередньо сформований пучок за допомогою об'єктного та кутового коліматорів формується в зонд за допомогою системи фокусування, що складається з набору активних іонно-оптичних елементів, таких як квадрупольні лінзи або надпровідний соленоїд. Для зміни положення зонда на поверхні зразка застосовується сканувальна система двох типів – механічна або електромагнітна, що здійснює зсув або досліджуваного зразка, або зонда відповідно.

Методи локального 3D-мікроаналізу товстих зразків із застосуванням сфокусованих пучків заряджених частинок розглядаються в порівнянні з ідеальними вимогами визначення просторового розміщення атомів і їх ідентифікації як хімічного елемента. Відсутність на сьогодні таких методів призводить до необхідності розгляду існуючих методів мікроаналізу з позицій, наскільки вони наближені до ідеальних вимог. У цьому зв'язку кожен метод оцінюється трьома основними параметрами: просторовою роздільною здатністю, межею виявлення та чутливістю. Просторова роздільна здатність визначається розмірами області, з якої відбувається вихід вторинних продуктів взаємодії частинок пучка з атомами досліджуваного зразка. Межа виявлення характеризує найменший склад елемента, що можна

виявити за заданою достовірною ймовірністю та пов'язаний із можливістю виділення корисного сигналу із сукупності детектованих подій. Під чутливістю методу потрібно розуміти його здатність виявити різницю між близькими концентраціями атомів елемента, що визначається. Чутливість

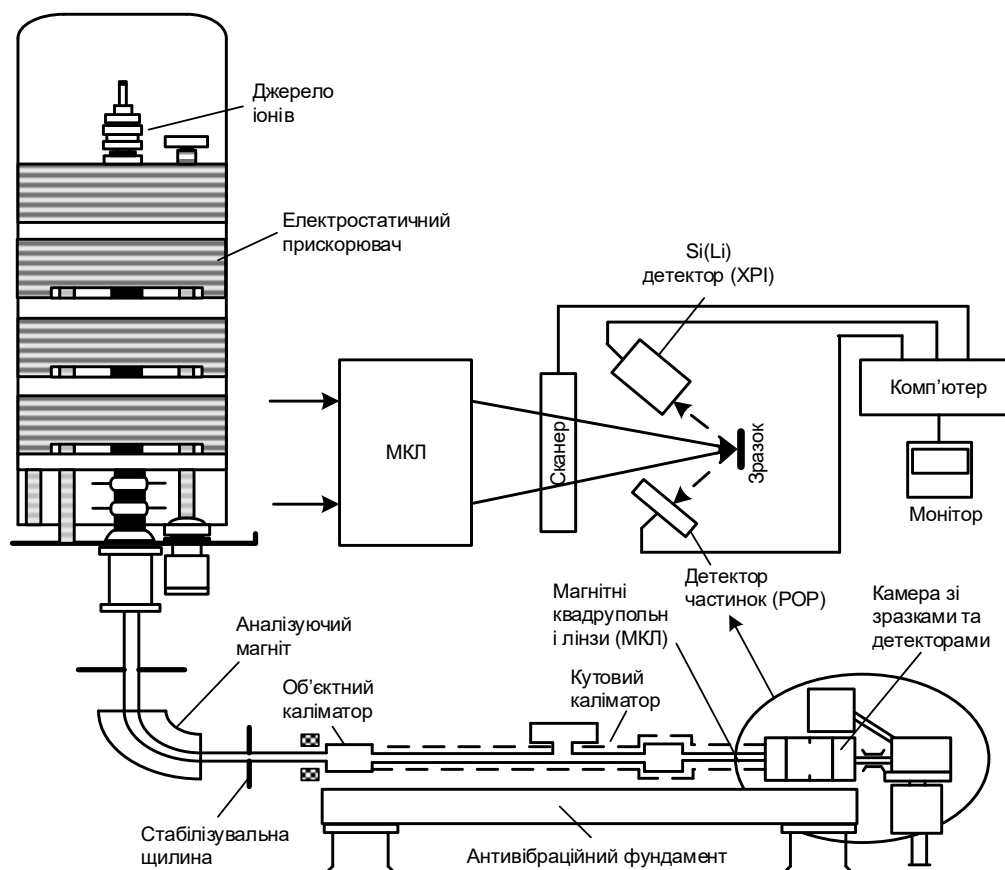


Рисунок 6.1 – Традиційна схема розміщення елементів і систем в ЯСМЗ

залежить від перетину процесу виходу вторинного продукту та пов'язана з кількістю частинок у зонді. Чутливість і дозвіл у більшості методів – пов'язані величини, оскільки забезпечення необхідної чутливості вимагає зростання кількості частинок або струму пучка, що, у свою чергу, пов'язано зі збільшенням розмірів зонда. Важливою властивістю кожного методу є також можливість проведення кількісного аналізу концентрації елементів у досліджуваній області зразка. У табл. 6.1 наведені найбільш часто вживані методи локального мікроаналізу в товстих зразках із застосуванням ЯСМЗ, де вказані значення дозволу та чутливості.

Таблиця 6.1 – Характеристики методів локального мікроаналізу із застосуванням ЯСМЗ

Метод	Роздільна здатність, нм	Чутливість, ppm	Кількісний аналіз (%)
PIXE	300	<1	5
RBS	500	10	3
NRA	1000	0,1	3
ERDA	>1000	500	3
IBIC	<100	-	Ні
IBIL	300	-	Ні
SEE	<100	-	-

Основними методами локального кількісного мікроаналізу, які в сукупності дозволяють проводити аналіз усіх елементів із масою, є перші чотири методи, зазначені в таблиці.

*Метод PIXE.* Метод характеристичного рентгенівського випромінювання індукованого іонами (PIXE) пучка обумовлений іонізаційними процесами атомів зразка. Спостережуваний рентгенівський спектр складається з безперервного спектра, викликаного гальмівним випромінюванням вторинних електронів, і лінійного спектра, пов'язаного з рекомбінацією іонізованих атомів і заповненням *K*-, *L*-, *M*- електронних оболонок. Сам метод PIXE досить добре розвинений, і його переваги ґрунтуються, як уже згадувалося вище, на порівняно низькому рівні гальмівного фону порівняно з електронними пучками в ЕРМА.

Удосконалення методу PIXE для підвищення локальності аналізу базується на зменшенні розмірів сфокусованого пучка на поверхні досліджуваного зразка. Однак у цьому разі значно зменшується струм пучка, а отже й кількість подій іонізації атомів. Збереження виходу PIXE за рахунок лише збільшення густини струму, що ґрунтується на застосуванні високояскравісних джерел іонів, може мати деякі межі, обумовлені радіаційними ушкодженнями вихідного матеріалу та привнесенням дефектів, не властивих початковому зразку. Інший шлях, пов'язаний зі збільшенням



тілесного кута детектора за рахунок збільшення його площі, не ефективний, оскільки в цьому разі погіршується дозвіл детектора та зростають ефекти накладення реєстрації подій, що мають малий часовий інтервал. Одним із напрямків вирішення цього завдання є розроблення матричних детекторів із відповідним контролером, що дозволяє синхронізувати набір усіх подій і поліпшити чутливість методу PIXE до кількох сотень ppm.

*Методи RBS і ERDA.* Методи, що базуються на реєстрації енергетичного спектра резерфордівського зворотного розсіювання (RBS) іонів і ядер віддачі (ERDA – elastic recoil detection analysis), що утворюються внаслідок ковзаючої взаємодії іонів пучка з поверхнею, найбільш поширені та дають високу точність при аналізі профілів розподілу елементів по глибині. Для загальноприйнятих напівпровідникових детекторів заряджених частинок дозвіл за глибиною  $\sim 10$  нм, а для методів детектування, що базуються на спеціалізованих спектрометрах, дозвіл досягає  $\sim 1 \text{ \AA}$ . При цьому зразки повинні мати поліровану поверхню. Найбільшою перешкодою, що стоїть на шляху отримання високої роздільної здатності для промислових та природних зразків, є шорсткість поверхні, що ускладнює інтерпретацію експериментальних результатів. Унаслідок своїх кінематичних особливостей метод RBS найбільш ефективний під час дослідження локального розподілу важких елементів у легкій матриці, наприклад у завданнях визначення домішок важких металів у біологічних об'єктах. Метод ERDA затребуваний при визначенні профілів концентрації водню в приповерхневих шарах досліджуваних матеріалів.

*Метод NRA.* Метод миттєвого випромінювання з ядерних реакцій (NRA – nuclear reaction analysis) базується на різноманітних ядерних взаємодіях легких іонів з енергією декількох мегавольтів з атомами зразка. Іон може подолати кулонівський бар'єр атомного ядра та наблизитися на відстань, порівнянну з радіусом ядра, тоді існує ймовірність, що відбудеться ядерна реакція, яка призведе до структурної зміни ядра. Результатом такої реакції будуть іони водню та гелію, нейтрони і  $\gamma$ -випромінювання, які

можуть бути зафіксовані детектуючими пристроями. Залежність перетину ядерної реакції від енергії для різних ядер має ряд вузьких резонансів. Тому ймовірність реакції буде найбільш високою, коли іони пучка володітимуть цією енергією. У міру збільшення енергії пучка та досягнення значення резонансної величини ядерні реакції для одного й того самого сорту атомів відбуватимуться з поверхні зразка. Подальше збільшення енергії пучка буде приводити внаслідок гальмування іонів до резонансної реакції з заглиблених шарів, що дозволяє визначати профілі розподілу елементів по глибині з дозволом  $\sim 10$  нм і чутливістю на рівні 0,1 ppm. Оскільки кулонівські сили для важких ядер значно знижують перетин реакцій, тому найбільш ефективними для діапазону енергій пучка  $< 5$  MeV є взаємодії з легкими ядрами зразка  $Z < 15$ . Висока вибірна здатність методу NRA є наслідком того, що енергетичні спектри та перетини ядерних реакцій різні для різних елементів і їх ізотопів.

*Метод IBIC.* Метод реєстрації заряду, індукованого іонним пучком (IBIC – ionbeaminducedcharge), найбільший розвиток отримав у 1990-х роках для дослідження пристроїв мікроелектроніки, розподілу дислокацій, напівпровідникових детекторів випромінювання, сонячних елементів і т. д. У цьому методі повною мірою використовуються особливості проходження легких іонів, прискорених до енергій декількох мегавольтів, у напівпровідникових матеріалах та ізоляторах. Мале відхилення іонів від прямолінійної траєкторії забезпечує високу просторову роздільну здатність методу порівняно з електронними пучками. Суть методу базується на здатності створення електрон-діркових  $e$ - $h$ -пар у напівпровідниковому матеріалі під час проходження іона, викликаного передачею його енергії. Можливість вимірювання кількості утворених  $e$ - $h$ -пар пов'язана з низкою внутрішніх і зовнішніх умов, таких як рекомбінація на точкових і розподілених дефектах, концентрації домішок, дифузійної довжини неосновних носіїв, напруженості електричного поля та ін. У методі IBIC застосовуються сфокусовані пучки легких іонів з енергією кількох

мегавольтів із дуже малими струмами в межах 0,1–1 фА і проводиться вимірювання індивідуальних імпульсів зарядів. Аналіз при таких низьких струмах пучка можливий, оскільки кожен іон генерує досить велику кількість  $e$ - $h$ -пар у напівпровідниковому матеріалі або ізоляторі, щоб загальний заряд міг володіти величиною сигналу вищою, ніж рівень шуму вимірювального приладу.

На рис. 6.2 показані основні типи компонувань вимірювальних схем у методі IBIC. Із рисунка бачимо, що носії зарядів, утворені всередині збідненої зони контактів приладу, повільно дифундують від місця своєї генерації, багато з них рекомбінують на точкових дефектах, наслідком чого є обмеження кількості зарядів, що дійшли до контактів приладу. Часовий інтервал, за який реєструється імпульс, змінюється від пікосекунд до мікрсекунд. У нормальному режимі вимірювань імпульс, створюваний зарядами, проходить попереднє посилення та посилюється до рівня кількох вольтів. Надалі відцифрований сигнал, маркований положенням пучка, накопичується системою збору даних (СЗД) у пам'яті комп'ютера. Внаслідок обробки даних інформація про мікроструктуру зразка подається у вигляді контрастного зображення концентрації електронів та дірок. Крім реєстрації сумарного накопиченого заряду у фіксованому положенні пучка, можливе також вимірювання часу еволюції індукованого заряду за рахунок зміни імпульсу на контактах (метод TRIBIC – time resolve IBIC). Це дозволяє визначити рухливість зарядів у досліджуваному зразку.

*Метод IBIL.* Метод люмінесценції, індукований іонним пучком (IBIL – ion beam induced luminescence) з енергією кількох мегавольтів, у поєднанні з такими методами, як PIXE, RBS, NRA, дає можливість отримувати інформацію про хімічну природу різних матеріалів. Найбільш загальним фізичним принципом є передача енергії від іонів пучка валентним електронам атомарних утворень досліджуваного зразка, що приводить їх у збуджений стан. Зворотний перехід у нормальний стан супроводжується випромінюванням в інфрачервоному / видимому / ультрафіолетовому

діапазонах. Для генерації люмінесценції в ЯСМЗ застосовуються пучки зі струмом  $\sim 100$  пкА, що пов'язано з низькою ефективністю детектувальних пристроїв, тому просторовий дозвіл методу IBIL знаходиться на рівні 0,3 мкм. Галузі застосування методу IBIL досить різноманітні, зокрема він застосовується в біології для вивчення клітин, дослідженнях артефактів історичної спадщини, дослідженнях напівпровідникових матеріалів та ін.

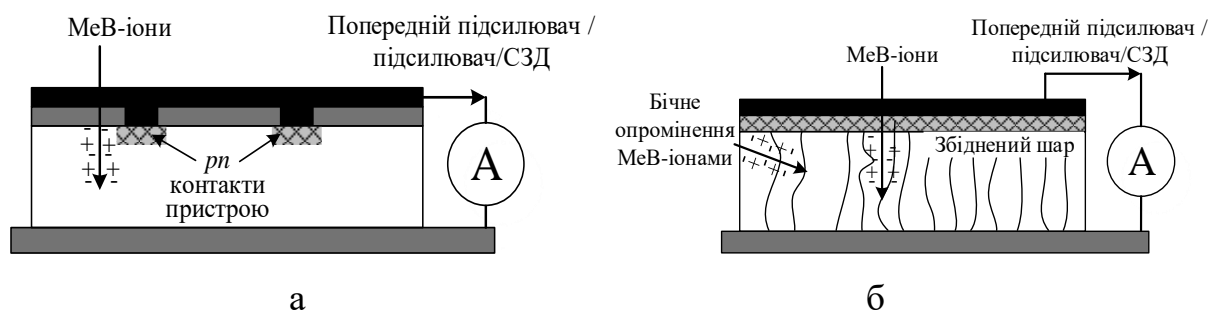


Рисунок 6.2 – Основні типи компонувань вимірювальних схем у методі IBIL: а – напівпровідниковий прилад; б – напівпровідникова пластина

*Методи SEE.* Методи, що базуються на застосуванні поодиноких іонів, мають узагальнену назву – ефекти поодиноких подій (SEE –single event effect). Хоча події можуть викликатися не лише іонами, а й іншими типами поодиноких впливів на досліджуваний об'єкт, такими як імпульсне електромагнітне випромінювання, або частинками, що не мають заряду. Далі будуть розглянуті лише поодинокі іони. Найбільший інтерес, пов'язаний із SEE, був викликаний у зв'язку із розвитком застосування космічних апаратів як цивільного, так і військового призначення. Серед космічного випромінювання найбільш небезпечними є високоенергетичні частинки, здатні проникати на достатню глибину в пристрої мікроелектроніки. Такого роду вплив призводить до цілого ряду ефектів, які можуть викликати збої роботи пристрою або призвести до повного його виходу з ладу. Фізичні аспекти походження ефектів збоїв ґрунтуються на принципах проходження заряджених частинок у напівпровідникових приладах. Як було показано вище, втрата енергії іона супроводжується утворенням  $e-h$  пар, що

призводять до відхилень у роботі пристрою, а утворення дефектів у мікроструктурі може зовсім вивести його з ладу. Тому під час розроблення пристроїв мікроелектроніки необхідно враховувати їх радіаційну стійкість, що й викликає певний інтерес до експериментального моделювання цих процесів. У зв'язку з мініатюризацією мікрочипів і переходом у нанометричну область масштабів виникає потреба прицільного потрапляння поодиноких іонів з енергією, що досягає десятки MeV/нуклон, у задану область тестованого зразка. Тому ЯСМЗ є найбільш прийнятним АК для реалізації таких досліджень. Однак тут потрібно зазначити, що просторовий дозвіл у режимі малих струмів, яке на цей час знаходиться на рівні  $\sim 50$  нм, вимірюється на напіввисоті повного розподілу струму пучка на мішені й при цьому наявне досить велике гало. Цей факт ускладнює безпосереднє застосування ЯСМЗ, тому в ряді лабораторій були проведені модернізації установок мікрозонда для цілей дослідження SEE на поодиноких іонах [27].

## **6.2 Ближньопольова НВЧ-діагностика матеріалів і середовищ**

### **6.2.1 Загальна характеристика методу ближньопольової діагностики**

Ближньопольова НВЧ-діагностика – неруйнівний прямий метод дослідження, що дозволяє отримувати інформацію про поверхневі та приповерхневі властивості різних середовищ. Вона базується на реєстрації частині НВЧ-впливу, локалізованої в ближньому полі зонда. Це дозволяє різко підняти роздільну здатність і подолати дифракційну межу для даних частот [28].

Локалізація НВЧ-сигналу в ближньому полі проводиться за допомогою установок, конструкція та принцип роботи яких розглянуті нижче. Основними факторами, що визначають роздільну здатність і точність вимірювань (відношення сигнал/шум), є: конструкція установки, властивості досліджуваного матеріалу, розмір вимірювального зонда, а також відстань від зонда до поверхні зразка. Аналіз отриманих даних проводиться за

допомогою досить складного апарату математичної фізики, методів чисельного аналізу, а також використання експериментальних досліджень методів діагностики матеріалів у НВЧ-діапазоні [9].

Ближньопольова НВЧ-діагностика активно застосовується для вивчення поверхні діелектричних і напівпровідникових плівок  $q$  отримання карт розподілу діелектричної проникності, виявлення дрібних дефектів і неоднорідностей, аналізу нелінійних характеристик. Така діагностика широко застосовується в галузі біології та медицини. У додатку до завдання дослідження біологічних об'єктів НВЧ-хвилі вигідно відрізняються від хвиль оптичного та інфрачервоного діапазонів, порівняно високу проникну здатність (від кількох міліметрів до дециметрів). Тому стає можливим вивчення не лише поверхневих, а й глибинних шарів (із відповідною втратою просторової роздільної здатності по поверхні). Ця особливість застосовується для візуалізації структури біологічних об'єктів, аналізу та візуалізації пухлин.

Перспективними є НВЧ-дослідження в галузі напівпровідникової мікро- та наноелектроніки, оскільки вони дозволяють отримувати багатопараметричну інформацію про поверхні та приповерхневі поверхні. Одним із застосувань НВЧ-діагностики є мікрохвильова мікроскопія в нанотехнологіях, яка на сьогодні використовується, наприклад, для аналізу технології отримання високотемпературних надпровідників, візуалізація поверхневого розподілу провідності, локальних вимірювань нелінійного НВЧ-відгуку і т. д.

Як приклад на рис. 6.3 наведені типові схеми радіовимірювальних перетворювачів (РХП) мікрохвильових мікроскопів.

Основою таких мікрозондів є коаксіальні лінії передач, які можуть бути виконані як в об'ємному, так і в мікросмуговому варіанті, що визначається параметрами та властивостями досліджуваного об'єкта.

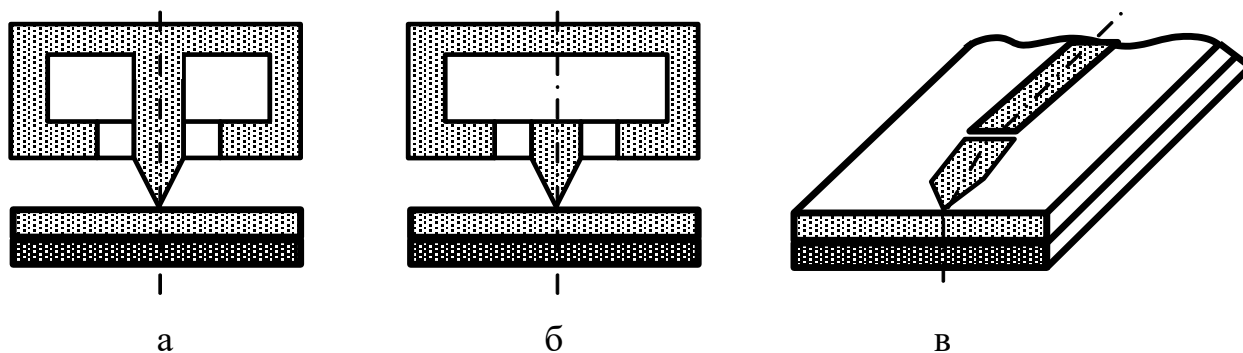


Рисунок 6.3 – Різновиди вимірювальних перетворювачів: а – коаксіальний; б – із підвищеною добротністю; в – мікросмуговий

Основними перевагами розглянутої мікрохвильової мікроскопії ближнього поля є: багатofункціональність, можливість додаткового впливу на зразок (постійним електричним полем, магнітним полем, додатковим НВЧ-полем, механічним і силовим полями тощо) і, найголовніше, можливість детального дослідження властивостей поверхневих шарів у НВЧ-діапазоні.

У праці [31] були розвинені фізичні основи мікрохвильової сканувальної мікроскопії (МСМС) напівпровідників і розроблена загальна концепція підвищення просторової роздільної здатності (на рівні 100 нм) та чутливості (багатопараметрової) МСМС. Ця концепція полягала: у максимальній просторовій локалізації енергії зондувального НВЧ-поля в нормальній до об'єкта електричній складовій резонаторного коаксіального мікрозонда; у формуванні сигналів сканування із широким застосуванням модуляційних принципів і додаткової їх інформаційної обробки сучасними засобами проектування РХП для МСМС із поділом областей накопичення НВЧ-поля і випромінювання у мікрозонд. На рис. 6.4 наведена загальна схема мікрохвильового сканування мікроструктур, що дозволила отримати просторовий дозвіл 1 мкм.

Показано, що внаслідок реконструкції (модернізації) цієї схеми роздільна здатність може бути підвищена на порядок (тобто просторова

роздільна здатність мікрохвильових мікроскопів може дорівнювати 100 нм), а можливо й більше.

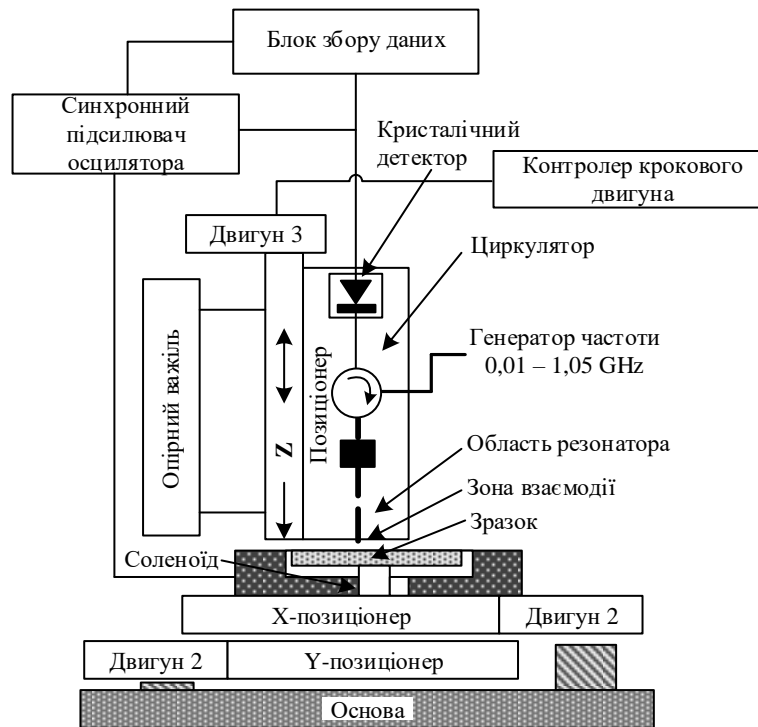


Рисунок 6.4 – Загальна схема мікрохвильового сканування мікроструктур

На підставі аналізу праць [16, 31] і поданих вище результатів можна виділити такі області застосування мікрохвильової мікроскопії:

- технологія високотемпературних надпровідників;
- візуалізація поверхневого розподілу;
- біологія і медицина: візуалізація структури біологічних об'єктів, дослідження та візуалізація пухлин.

До перспективних областей застосування цього напрямку потрібно віднести:

- напівпровідникова мікро- та нанoeлектроніка;
- багатопараметричні дослідження поверхні та приповерхневих поверхонь, нанокластерів;
- топологія розподілу електрофізичних параметрів матеріалів;



- можливість нетеплової локальної модифікації поверхні та приповерхневих шарів.

### 6.2.2 Типові схеми мікрохвильових мікроскопів

Сканувальні мікрохвильові мікроскопи використовуються для дослідження матеріалів на мікрохвильових частотах і для вимірювання змін опору. Найбільш типові схеми таких пристроїв наведені на рис. 6.5 і 6.6.

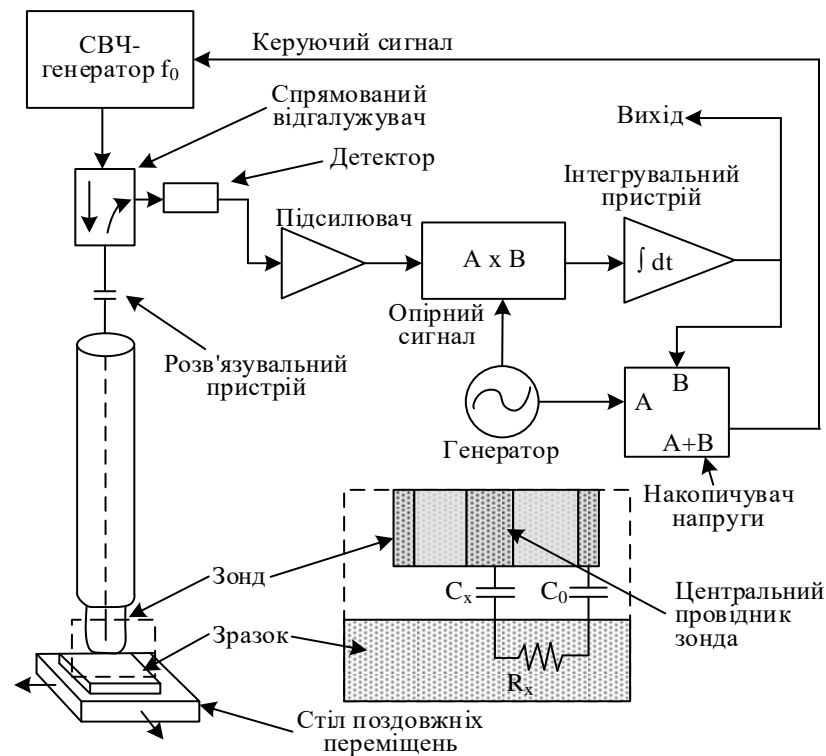


Рисунок 6.5 – Схема мікрохвильового мікроскопа з ІП на основі відрізка коаксимальної лінії

Мікрохвильовий сигнал від джерела входить у лінійний резонатор із коаксимальною лінією передачі, обмеженої з одного боку розв'язувальною ємністю, а з іншого — відкритим коаксимальним зондом. За рахунок багаторазового відбиття в коаксимальному резонаторі (із добротністю  $Q \sim 10^2 - 10^3$ ) вдається значно зменшити шум і підвищити точність вимірювань, але при цьому виникає необхідність перебудови параметрів резонатора при вимірюванні на різних частотах.

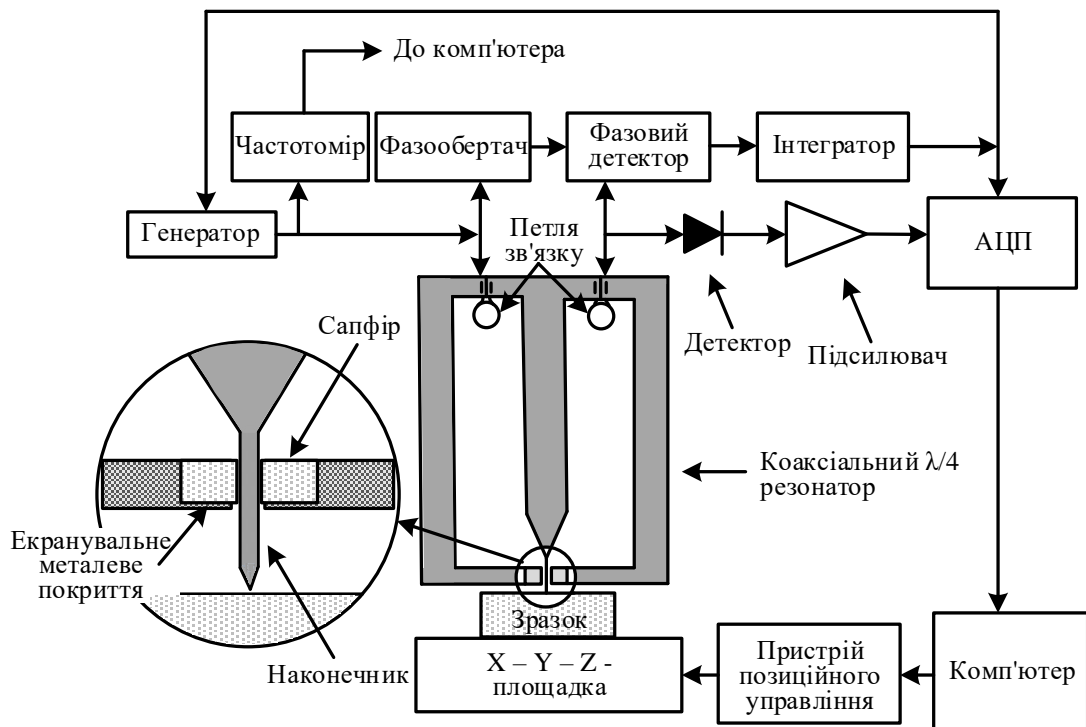


Рисунок 6.6 – Схема мікрохвильового мікроскопа з ІП на основі коаксіального резонатора

Для того щоб контролювати відстань між зразком і зондом, встановлюється залежність відбитого сигналу від відстані до зразка. Прив'язка системи до зразка переважно ємнісна. Якщо зразок металевий, то він становить одну обкладку конденсатора, а інша формується центральним провідником коаксіального зонда. При зменшенні відстані між зондом і зразком ємність зростає, що призводить до падіння резонансної частоти коаксіального резонатора. В одному граничному випадку, коли зонд перебуває далеко від зразка, лінія передачі з відкритим кінцем має кінцевий імпеданс. У цьому разі подана система – це напівхвильовий резонатор із резонансною частотою  $f_0$ . В іншому граничному випадку, коли зразок знаходиться в контакті із зондом, ланцюг замикається. Така схема має назву «контакт Корбіно». У даному випадку система є чвертьхвильовим резонатором і резонансна частота зменшується на

$$\Delta f_{\max} = \frac{1}{2} \frac{c}{\varepsilon_r^{1/2}} \frac{2L}{L}, \quad (6.1)$$

де  $L$  – довжина коаксіального резонатора;  $\varepsilon_r$  – відносна діелектрична стала коаксіального кабелю. Для типових відстаней між зондом і зразком зміщення частоти досягає значень між 0 та  $\Delta f$ .

Просторова роздільна здатність мікроскопа не залежить від частоти вимірювання, і система може працювати в широкому інтервалі частот. Це означає, що карту поверхневого розподілу властивостей матеріалу можна отримувати точно на тій частоті, на якій буде використовуватися матеріал. Наприклад, розглянемо мікроскоп із довжиною коаксіального резонатора  $L = 2$  м. У цьому разі частота основної (фундаментальної) моди становить приблизно 50 МГц, і можна отримати овертони, кратні 50 МГц, доступні для отримання зображення. Верхня межа частоти мікроскопа задається відповідно з робочою шириною смуги електроніки. На практиці мікрохвильове джерело має верхню межу частоти 50 ГГц. Однак мікрохвильова спрямована котушка (сполучна муфта), детектор і коаксіальний кабель теж можуть обмежувати ширину частотної смуги мікроскопа. Однак можна сконструювати мікроскоп, який має майже безперервне зображення за трьома десятками частот від 50 МГц до 50 ГГц.

Для аналізу надпровідних керамічних зразків необхідні кількісні безпосередні та руйнівні методи дослідження характеристик тонких плівок. При цьому метод повинен забезпечувати високу просторову роздільну здатність і бути високошвидкісним. Бажано також, щоб установка для аналізу мала просту конструкцію, складалася з комерційно доступних компонентів і забезпечувала безпосередню інтерпретацію зображення. Всім переліченим вище вимогам відповідає МСМС.

Неруйнівний спосіб отримання зображень мікрохвильового поверхневого опору був продемонстрований із використанням різних систем резонансних зондів. Найкращі результати із зображення дисипації у зразку отримані при вимірах добротності  $Q$ . Для визначення взаємозв'язку між  $Q$

мікроскопа та поверхневим опором зразка  $R_x$  була використана алюмінієва плівка змінної товщини на скляній підкладці. Перетин тонкої плівки клиноподібний, тому можна зіставити зміну поверхневого опору з параметрами сканування. Використовуючи зонд із центральним провідником діаметром 500 мкм і вибираючи резонанс мікроскопа та частоту 7,5 ГГц, автори роботи отримали дані про зміщення частоти і  $Q$ , що дозволило побудувати топографію розподілу поверхневого опору тонкої плівки на сапфіровій підкладці [16].

### **6.3 Теми практичних (семінарських) занять і контрольні питання до розділу 6**

#### **Теми практичних (семінарських) занять**

1. Основні типи АК для діагностики матеріалів, що базуються на сфокусованих пучках заряджених частинок (п. 6.1).
2. Основні принципи побудови ядерного сканувального мікрозонда і загальна схема розташування його основних елементів (п. 6.1.1).
3. Основні методи локального кількісного мікроаналізу та їх коротка характеристика (п. 6.1.1)
4. Загальна методика ближньопольової діагностики та схема мікрохвильового сканування мікроструктур (п. 6.2).
5. Схема та принцип роботи мікрохвильового мікроскопа на основі відрізка коаксіальної лінії (п. 6.2.2).
6. Схема та принцип роботи мікрохвильового мікроскопа на основі коаксіального резонатора (п. 6.2.2).

#### **Контрольні питання**

1. Які апаратурні комплекси з діагностики мікро-і нанорозмірних об'єктів вам відомі?
2. Які види сфокусованих пучків заряджених частинок застосовуються в діагностиці матеріалів?

3. У чому полягають основні методи зондового мікроаналізу?
4. У чому полягає перевага мікроаналізу іонним пучком порівняно з електронним?
5. Які основні фізичні принципи покладені в основу побудови ядерного сканувального мікросонда?
6. У чому полягають загальні принципи побудови структурної схеми ядерного скануючого мікросонда?
7. Чому одним з основних методів мікроаналізу є метод PIXE?
8. Для яких матеріальних зразків використовуються методи мікроаналізу RBS і ERDA?
9. У чому полягають фізичні принципи побудови нетрадиційних методів діагностики NRA, IBIC і IBIL?
10. У чому полягають загальні принципи побудови ближньопольової НВЧ-діагностики матеріалів?
11. На яких різновидах вимірювальних перетворювачів ґрунтуються методи ближньопольової НВЧ-діагностики?
12. У чому полягають основи побудови схем мікрохвильового сканування мікроструктур?
13. У чому полягає принцип роботи мікрохвильового мікроскопа на основі відрізка коаксіальної лінії?
14. У чому полягає принцип роботи мікрохвильового мікроскопа на основі коаксіального резонатора?

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Радіофізичні методи діагностики матеріалів і середовищ : підручник / Г. С. Воробйов, Г. О. Пономарьова, О. О. Рибалко та ін. – Суми : Сумський державний університет, 2014. – 198 с.
2. Бадалян В. Г. Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов / В. Г. Бадалян, Е. Г. Базулин, А. Х. Вopilкин и др.; под ред. А. Х. Вopilкина. – М., 2008. – 298 с.
3. Брюховецкий Ю. А. Практическое руководство по ультразвуковой диагностике. Общая ультразвуковая диагностика. – 2-е издание / Ю. А. Брюховецкий, С. Г. Бурков, Н. В. Заболотская и др.; под ред. В. В. Митькова. – М. : Видар-М, 2011. – 712 с.
4. Горелик С. С. Рентгенографический электронно-оптический анализ: учебное пособие для вузов / С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев. – М. : МИСИС, 1994. – 328 с.
5. Гурвич А. К. Неразрушающий контроль: практическое пособие: в 5 кн. / под ред. В. В. Сухорукова. – М. : Высш. шк., 1991-1992. – 1427 с.
6. Каневский И. Н. Неразрушающие методы контроля / И. Н. Каневский, Е. Н. Сальникова. – Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с.
7. Федоров Г. Є. Контроль якості продукції в машинобудуванні: навч. посіб. / Г. Є. Федоров, М. М. Ямшинський, А. М. Фусенко та ін. – К. : Політехніка, 2008. – 332 с.
8. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2005–2006. – 5977 с.
9. Куценко В. П. Методы и средства сверхвысокочастотной радиометрии / В. П. Куценко, Ю. А. Скрипник, Н. Ф. Трегубов и др. – Севастополь : Вебер, 2012. – 324 с.
10. Усиков А. Я. Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн / А. Я. Усиков, Э. А. Канер, И. Д. Трутень и др.; под ред. А. Я. Усикова. – К. : Наукова думка, 1988. – 368 с.

11. Breese M. B. Materials analysis using a nuclear microprobe / M. B. Breese, D. N. Jamieson, P. J. King at al. – New York, 1996. – 428 p.
12. Черепин В. Т. Ионный микрозондовый анализ. – К. : Наук. думка, 1992. – 344 с.
13. Проценко І. Ю. Прилади і методи дослідження плівкових матеріалів: навч. посіб. / І. Ю. Проценко, А. М. Чорноус, С. І. Проценко; за заг. ред. І. Ю. Проценка. – Суми : Видавництво СумДУ, 2007. – 264 с.
14. Reed S. J. Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology / S. J. Reed. – Cambridge : University Press, 2005. – 215 p.
15. Pennycook S. J. Scanning Transmission Electron Microscopy: Imaging and Analysis / S. J. Pennycook, P. D. Nellist. – Springer, 2011. – 774 p.
16. Погребняк А. Д. Применение микро- и нанозондов для анализа малоразмерных 3D-материалов, наносистем и нанообъектов / А. Д. Погребняк, А. Г. Пономарев, А. П. Шпак и др. // Успехи физических наук. – 2012. – Т. 182, № 3. – С. 287-321.
17. Соколов С. В. Теорія електромагнітного поля та основи техніки НВЧ: навч. посіб. / С. В. Соколов, Л. Д. Писаренко, В. О. Журба; за заг. ред. Г. С. Воробйова. – Суми : Сумський державний університет, 2011. – 394 с.
18. Карпов Ю. О. Теоретичні основи електротехніки. Електромагнітне поле: навчальний посібник / Ю. О. Карпов, Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 406 с.
19. Vorobjov G. Electromagnetic Waves / G. Vorobjov, Y. Shulga, V. Zhurbenko, Edited by Vitaliy Zhurbenko. – Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, 2011. – 587 p.
20. Чернышев П. Н. Техническая электродинамика: учебное пособие / П. Н. Чернышев, В. П. Самсонов, Н. П. Чернышев. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2006. – 272 с.
21. Шматько А. А. Электронные приборы сверхвысоких частот: учебное пособие / А. А. Шматько. – Харьков : ХНУ им. В. Н. Каразина, 2006. – 328 с.

22. Бизнюк В. В. Квантовые источники излучения / В. В. Бизнюк, С. М. Гвоздев. – М. : ВИГМА, 2006. – 400 с.
23. Аксенов А. И. Вакуумная и плазменная электроника: учебное пособие / А. И. Аксенов, А. Ф. Злобина. – Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 168 с.
24. Фізичні основи електронної техніки: за ред. З. Ю. Готри. – Л. : Бескид Біт, 2004. – 879 с.
25. Артемьев Б.В. Радиационный контроль: учебное пособие / Б.В. Артемьев, А.А. Буклей; под. общ. ред. В.В. Ключева. - М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 192 с.
26. Майоров А.А. Цифровые технологии в радиационном контроле // В мире неразрушающего контроля. – 2009. - № 3. – С. 5-12.
27. Watt F. Principles and application of high-energy microbeams / F. Watt, G. Grime. – Bristol UK : Adam Hilger Ltd., 1987. – 399 p.
28. Сліпченко М. І. Фізичні основи ближньопольової НВЧ-діагностики матеріалів і середовищ: автореф. дис. ...д-ра фіз.-мат. наук 01.04.01 / М. І. Сліпченко. – Суми : СумДУ, 2008. –36 с.
29. Paulsen K. D., Meaney P. M., Gilman L. C., Alternative Breast Imaging. Four Model-Based Approaches, Boston: Springer Science + Business Media, Inc., 2005.
30. P. M. Meaney et al., A Clinical Prototype for Active Microwave Imaging of the Breast. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, November 2000, vol. 48, no. 11, pp. 1841–1853. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/22.883861>
31. S. Y. Semenov et al., Microwave-Tomographic Imaging of the High Dielectric-Contrast Objects Using Different Image-Reconstruction Approaches, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, July 2005, vol. 53, no. 7, pp. 2284–2294. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/TMTT.2005.850459>.